

Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

ESTUDO OBSERVACIONAL DA CANDIDATA A
VARIÁVEL CATACLÍSMICA MAGNÉTICA
CSS110225:112749-054234

MATHEUS SOARES PALHARES

São José dos Campos - SP
2015

Matheus Soares Palhares

ESTUDO OBSERVACIONAL DA CANDIDATA A VARIÁVEL
CATACLÍSMICA MAGNÉTICA CSS110225:112749-054234

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, como complementação dos créditos necessários para a obtenção do título de Mestre em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Soares de Oliveira

São José dos Campos - SP
2015

Matheus Soares Palhares

ESTUDO OBSERVACIONAL DA CANDIDATA A VARIÁVEL
CATACLÍSMICA MAGNÉTICA CSS110225:112749-054234

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Soares de Oliveira

Orientador/UNIVAP
São José dos Campos - SP

Presidente: Prof. Dr. Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho

UNIVAP
São José dos Campos - SP

Profa. Dra. Cláudia Vilega Rodrigues

INPE
São José dos Campos - SP

Prof. Dr. Oli Luiz Dors Junior

UNIVAP
São José dos Campos - SP

Suplente: Profa. Dra. Angela Cristina Krabbe

UNIVAP
São José dos Campos - SP

Profa. Dra. Sandra Maria Fonseca da Costa
Diretora do IP&D – UNIVAP
São José dos Campos, 07/08/2015.

*"Com a minha mente, vou a mil lugares
E a imaginação me dá forças pra voar
Sonhos desejamos alcançar
Ser alguém com um poder maior
Que você já tem
Liberdade é correr pelo céu
Sempre unidos vamos triunfar
E, se a nossa luta é pra valer
vou mostrar meu valor[...]"*
ANÍSIO MELLO JÚNIOR

AGRADECIMENTOS

A Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar o caminho nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Soares de Oliveira, por ter aceitado o desafio de ensinar a um jovem físico sobre os pequenos e complicados objetos estelares que são as variáveis cataclísmicas.

Ao grupo de variáveis cataclísmicas magnéticas, Dra. Cláudia Vilega Rodrigues, Dr. Dionísio Cielinski, Dra. Karleyne Medeiros G. Silva, Dr. Leonardo Almeida e a Isabel Lima, por compartilhar o conhecimento sobre, e ensinar técnicas para a observação destes objetos.

Aos professores do Programa de Física e Astronomia pela acolhida nestes dois anos de pós-graduação. Agradeço a eles por toda orientação extra para o meu crescimento não só profissional, mas pessoal. Agradeço também ao Prof. Dr. Peter Leroy Faria, que me indicou a UNIVAP para a continuação dos estudos de astrofísica iniciados na graduação.

A minha querida família que apoiou a ideia de me mudar para uma cidade em menos de um mês. A todo o apoio que me deram nos momentos difíceis e complicados que passei.

Ao meu anjo querido, Marcela, pelo apoio e, principalmente, por ter (e estar) aguentando toda a saudade que sentimos um do outro. Ela que foi uma peça importante para me manter aqui por essa curta (mas longa) jornada. E que agora serão mais alguns anos para o doutoramento de ambos. Só tenho a agradecer ao meu porto seguro, meu universo, minha pequena. Por toda compreensão nas horas difíceis, nos momentos de maior angústia, soubemos superar estes momentos.

A meus amigos das Minas Gerais, eles que sempre quando sobrava um tempinho para ir praquelas bandas marcávamos de nos encontrar. Agradeço ao Bruno por ter compartilhado a ideia do mestrado comigo e depois de um ano aceitar a morar comigo para dividirmos essa nova experiência. Aos amigos da pós-graduação que tornaram essa caminhada divertida e menos complicada. A todas as promessas de churrasco não cumpridas por falta de encontrar um tempo para tal tarefa “árdua”.

Ao apoio financeiro da CAPES, que permitiu a melhor adaptação em terras Joseenses.

A todos os funcionários da UNIVAP, os quais ajudaram e ajudam, indiretamente a minha formação.

RESUMO

No âmbito de um projeto de busca por novos objetos da classe de Variáveis Cataclísmicas polares, selecionamos para um estudo observacional detalhado a candidata CSS110225:112749-054234. Este objeto transiente foi descoberto pelo *Catalina Real Time Transient Survey* (CRTS) em 2011, quando transitou do estado de baixo para alto brilho. Neste trabalho apresentamos a análise de dados na região do óptico espectroscópicos obtidos com telescópio SOAR, juntamente com dados fotométricos e polarimétricos obtidos no OPD/LNA. Nossos espectros mostram linhas de Balmer intensas em emissão, com decremento de Balmer invertido, e a linha de HeI 4686 Å também em emissão, características de espectros de polares em alto estado de transferência de matéria. As velocidades radiais das linhas de Balmer, HeI e HeII apresentam uma modulação senoidal com período de 0,056 dias. As curvas de luz têm variação com amplitude de até 1,5 mag e são dominadas por variações irregulares. Uma das curvas de luz, no entanto, mostra modulação quando binada em fase com o período encontrado na espectroscopia. A CSS110225 apresenta polarização circular relativamente baixa nos filtros V e I, com amplitude menor que 5%. Modulação com o período espectroscópico parece estar presente na curva de polarização do filtro I binada em fase. Não há correlação deste objeto com nenhuma fonte de raios-X. Os dados deste trabalho mostram que CSS110225 tem algumas características compatíveis com as polares, mas não descartam a possibilidade de ser uma polar intermediária. A eventual detecção de modulação associada à rotação da anã branca não sincronizada com o período orbital confirmaria a classificação deste objeto como uma polar intermediária (IP).

Palavras-chave: Astrofísica estelar; Variáveis Cataclísmicas; Polares.

ABSTRACT

Within the framework of a project to search for new objects of the polar Cataclysmic Variable class, we selected the candidate CSS110225:112749-054234 for a detailed observational study. This object has been discovered by *Catalina Real Time Transient Survey* (CRTS) in 2011 when transiting from low to high brightness states. In this work we present the analysis of spectroscopic data, obtained at SOAR telescope, and photometric and polarimetric data obtained at OPD/LNA. Our spectra show intense Balmer emission lines with inverted Balmer decrement, and the He I 4686 Å line also in emission, which are characteristics of polar spectra in high states of mass transfer. The radial velocities of the Balmer, He I and He II lines present a sinusoidal modulation with a period of 0.056 days. The light curves show variation with amplitude of 1.5 mag and are dominated by irregular variations. One of the light curves, however, shows modulation when binned in phase with the spectroscopic period. CSS110225 has relatively low circular polarization in filters V and I, with amplitude lower than 5%. Modulation with the spectroscopic period seems to be present in the filter I polarization curve when binned in phase. There is no correlation of this object with any X-ray source. Our data show that CSS110225 may be a polar, but do not rule out the possibility of being an intermediate polar. Possible future detection of modulation associated with the rotation of a non-synchronized white dwarf with the orbital period would confirm the classification of this object as an intermediate polar (IP).

Keywords: Stellar astrophysics; Cataclysmic Variables; Polars.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 Componentes do sistema binário, M_1 e M_2 , e seus campos de potencial gravitacional. A equipotencial que passa pelo ponto L_1 é conhecida como superfície equipotencial de Roche.	2
2 Potenciais gravitacionais das estrelas do sistema binário. Cada vale representa o potencial das estrelas. A matéria é transferida pelo ponto Lagrangiano L_1	2
3 Trajetória da matéria transferida da secundária para a primária.	3
4 Distribuição de períodos orbitais de variáveis cataclísmicas.	5
5 Modelo de sistema polar, onde a secundária transfere matéria através de uma coluna de acreção devido ao intenso campo magnético da anã branca.	7
6 Distribuição de períodos orbitais de todos os sistemas VCs (preto) e dos sistemas VCs magnéticos (verde). A linha azul representa a distribuição cumulativa das PIs e a vermelha a distribuição cumulativa das polares. . .	9
7 Oscilação perpendicular do campo elétrico de um fóton em relação ao eixo de propagação (superior esquerdo). Elétrons na presença de linhas de campo magnético tem um movimento espiral com frequência ciclotrônica através das linhas de campo magnético produzindo a radiação ciclotrônica. Quando vistos de lado (inferior) produz fótons com polarização linear. Vistos diretamente (direita) a polarização dos fótons é circular	11
8 Região de choque da coluna de acreção.	13
9 <i>Finding Chart</i> de CSS110225. Campo de Visão de 5', o norte é para a direita e o leste é abaixo. A estrela V é a CSS110225, C1 é a primeira estrela de comparação para fotometria diferencial e assim por diante. A duplicação deve-se ao analisador de calcita usado na aquisição das imagens com o polarímetro.	19
10 <i>Finding Chart</i> de CSS110225 obtido do <i>Digitized Sky Survey</i> (DSS) com um campo de visão de 10'. O norte é para a direita e o leste é abaixo. . . .	20
11 Curva de luz obtida pelo CRTS. O estado de baixo brilho está em vermelho e o de alto brilho em azul, as linhas azuis e vermelhas são as barras de erro associado a cada estado. As linhas verticais representam nossos dados e em verde dados espectrais em roxo dados polarimétricos.	21
12 Espectro exploratório médio, obtido em 2012. Nota-se o decremento de Balmer invertido e a presença de Hell 4686 Å em baixa intensidade. . . .	32

13	Espectro médio da série temporal de 15 espectros obtidos em 2013. A intensidade foi normalizada pelo contínuo pois na época não foram observadas estrelas padrões espectrofotométricas.	33
14	Espectro médio da série temporal de 23 espectros obtidos em 2015	34
15	Espectros da linha de $H\beta$ da série temporal de 2013. A linha vertical corresponde ao comprimento de onda de repouso desta linha. No eixo das ordenadas temos a distribuição dos espectros em fase orbital em relação à efeméride espectroscópica de 2013.	35
16	Espectros da linha de $H\beta$ da série temporal de 2015. A linha vertical corresponde ao comprimento de onda de repouso desta linha. No eixo das ordenadas os espectros estão linearmente distribuídos na ordem cronológica de obtenção dos dados (de baixo para cima) para permitir uma melhor visualização.	36
17	Velocidade radial das linhas de $H\beta$, $H\gamma$ e da linha telúrica de [OI] dos dados de 2013.	36
18	Velocidade radial das linhas de $H\delta$, $H\epsilon$ e da linha telúrica de [OI] dos dados de 2013.	37
19	Velocidade radial das linhas de $H\beta$, $H\gamma$ e a linha telúrica [OI] dos dados de 2015.	37
20	Velocidade radial das linhas de $H\delta$, $H\epsilon$ e a linha telúrica [OI] dos dados de 2015.	38
21	Periodograma obtido para os dados de velocidade radial da linha de $H\beta$ de 2013.	38
22	Periodograma obtido para os dados de velocidade radial da linha de $H\beta$ de 2015.	39
23	Curva de velocidade radial de $H\beta$ em função da fase orbital dos dados 2013. A curva apresenta o melhor ajuste senoidal aos pontos e a reta horizontal representa a velocidade sistêmica $\gamma = 22$ km/s.	39
24	Curva de velocidade radial de $H\beta$ em função da fase orbital dos dados 2015. A curva apresenta o melhor ajuste senoidal aos pontos e a reta horizontal representa a velocidade sistêmica $\gamma = -35$ km/s.	40
25	Curvas de luz da CSS110225 e das estrelas de comparação C2, C3 e C4 (indicadas na Fig. 9), obtidas em 25, 26 e 27 de abril de 2014 (de cima para baixo no gráfico). Os pontos pretos representam V-C1, os círculos vermelhos C2-C1, os quadrados verdes C3-C1 e os losangos azuis C4-C1. Em 26 de abril (diagrama central) usamos o filtro I, nas demais noites filtro V.	42
26	Fotometria do dia 25. Em preto V-C1 e em vermelho C4-C1.	43
27	Fotometria do dia 26. Em preto V-C1 e em vermelho C4-C1.	44
28	Fotometria do dia 27. Em preto V-C1 e em vermelho C4-C1.	44
29	Fotometria do dia 25 em fase com o período espectroscópico de 0,056 dias.	45

30	Fotometria do dia 26 em fase com o período espectroscópico de 0,056 dias.	45
31	Fotometria do dia 27 em fase com o período espectroscópico de 0,056dias.	46
32	Binagem dos dados de fotometria do dia 25 de acordo com o período orbital de 0,056 dias. A barra de erro representa a dispersão dos pontos e não o erro das medidas fotométricas.	46
33	Polarização do dia 25, sendo V a polarização circular, P a polarização linear e θ o ângulo de posição da polarização linear.	47
34	Polarização do dia 26, sendo V a polarização circular, P a polarização linear e θ o ângulo de posição da polarização linear.	48
35	Polarização do dia 27, sendo V a polarização circular, P a polarização linear e θ o ângulo de posição da polarização linear.	49
36	Binagem dos dados polarimétricos do dia 26 utilizando o período orbital de 0,056 dias. As barras de erro correspondem a dispersão dos pontos da polarização e não ao erro associado a polarização.	49

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1	Sistemas observados no projeto de espectros exploratórios. 15
2	Observações dos dados coletados 23
3	Estrelas padrões não polarizadas. 28
4	Estrelas padrões polarizadas. 28
5	Identificação, largura equivalente (EW) e largura à meia-altura (FWHM) de linhas de emissão no espectro médio de CSS110225 nos anos de 2012, 2013 e 2015. 31
6	Parâmetros orbitais do ajuste senoidal às velocidades radiais da linha de $H\beta$. 33
7	Valores médios da polarização circular de CSS110225 e das estrelas de comparação presentes no campo 48

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	Introdução	1
1.1	Variáveis Cataclísmicas	1
1.1.1	Geometria do Sistema	1
1.1.2	Perda de Momento Angular e Transferência de matéria	3
1.1.3	Classes de Variáveis Cataclísmicas	6
1.2	Polares	7
1.2.1	Componentes do sistema	8
1.2.2	Evolução	8
1.2.3	Acresção nas polares	10
2	Projeto de busca por novas Polares	14
2.1	Motivação para o projeto	14
2.2	O <i>Catalina Real-Time Transient Survey</i>	14
2.3	Projeto Observacional de Busca por Polares e CBSS	18
3	Observação e Redução de Dados	22
3.1	Observações	22
3.2	Redução de dados	23
3.3	Espectroscopia	24
3.4	Polarimetria	25
3.4.1	Cálculo da Polarização	26
3.4.2	Ajuste do ângulo de polarização	28
3.5	Fotometria	28
4	Resultados	30
4.1	Espectroscopia	30
4.1.1	Espectros médios	30
4.1.2	Velocidades radiais e análise de periodicidades	30
4.2	Fotometria	41
4.3	Polarimetria	47
5	Discussão e conclusões	50

Bibliografia	54
-------------------------------	-----------

1 Introdução

1.1 Variáveis Cataclísmicas

1.1.1 Geometria do Sistema

Variáveis cataclísmicas (VCs) são sistemas binários compostos de uma estrela anã branca (primária) e uma estrela da sequência principal (secundária). Normalmente a secundária é uma estrela do tipo G, K ou M de baixa massa. As estrelas componentes das variáveis cataclísmicas estão bastante próximas entre si, geralmente separadas por uma distância $a \approx 1R_{\odot}$. Por consequência elas estão sujeitas a forças de maré. A secundária tem sua rotação sincronizada com o movimento orbital do sistema e este, por sua vez, tende a sofrer uma circularização de sua órbita. Tendo a estrela primária e a secundária massas M_1 e M_2 , respectivamente e considerando que o sistema possui órbita circular, podemos expressar o período orbital do sistema a partir da terceira lei de Kepler e da lei da gravitação de Newton, como

$$P_{orb} = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{G(M_1 + M_2)}}, \quad (1)$$

sendo a a separação entre as estrelas e G a constante gravitacional.

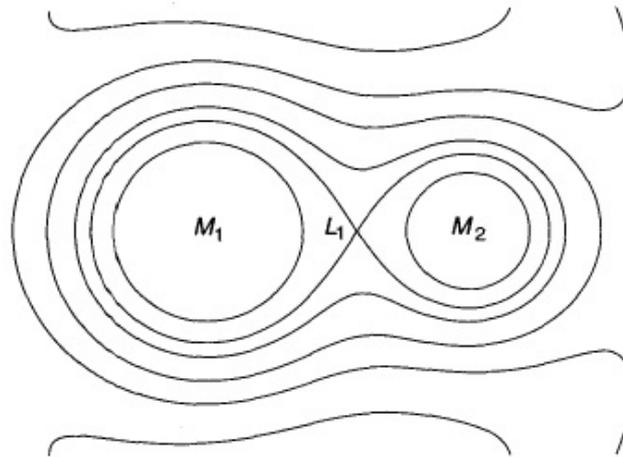
A soma dos potenciais gravitacionais de ambas as componentes do sistema gera um campo de equipotenciais que pode ser expresso como

$$\Phi = -\frac{GM_1}{|r - r_1|} - \frac{GM_2}{|r - r_2|} - \frac{1}{2}(\omega \wedge r)^2, \quad (2)$$

sendo r a soma dos potenciais gravitacionais Φ das duas estrelas localizadas em r_1 e r_2 respectivamente, G a constante gravitacional e o terceiro termo é a força centrífuga sendo ω a frequência angular orbital.

Como pode ser inferido na Figura 1, as superfícies equipotenciais possuem um formato aproximadamente esférico próximo às estrelas e mais distorcido a medida que se afastam. A superfície equipotencial que passa pelo ponto de Lagrange interno, L_1 , é conhecida como superfície equipotencial de Roche, definindo dois lóbulos que envolvem as duas componentes estelares. A forma dos lóbulos de Roche é determinada pela razão de massas q , definida como $q = M_2/M_1$ e suas dimensões são determinadas pela separação a entre as componentes. A Figura 2 mostra uma representação deste potencial. Em uma variável cataclísmica a estrela secundária

Figura 1 - Componentes do sistema binário, M_1 e M_2 , e seus campos de potencial gravitacional. A equipotencial que passa pelo ponto L_1 é conhecida como superfície equipotencial de Roche.



FONTE: Hellier (2001)

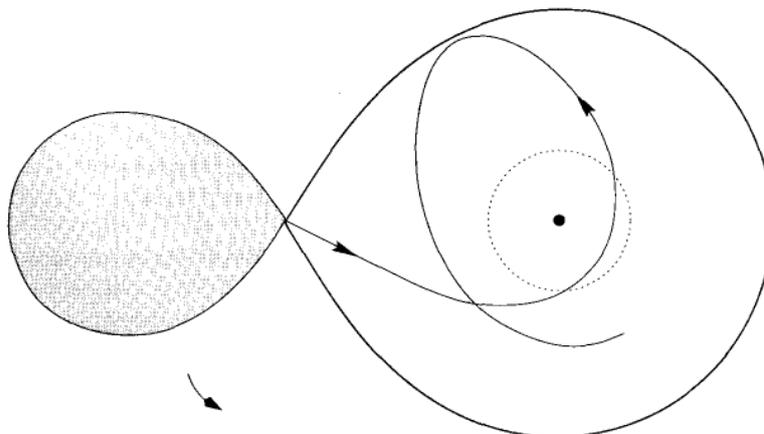
Figura 2 - Potenciais gravitacionais das estrelas do sistema binário. Cada vale representa o potencial das estrelas. A matéria é transferida pelo ponto Lagrangiano L_1 .



FONTE: Adaptado de Hellier (2001)

ria preenche o seu lóbulo de Roche de tal forma que sua matéria transpõe o ponto de potencial L_1 , passando, assim, para a primária. O preenchimento se dá pela expansão evolutiva da estrela secundária ou pela contração orbital resultante da perda de momento angular do sistema (maiores detalhes na seção 1.1.2). Podemos observar que, como mostrado na Figura 2, a matéria transferida para a primária não consegue retornar para seu lugar de origem, ficando restrita ao lóbulo de Roche da primária.

Figura 3 - Trajetória da matéria transferida da secundária para a primária.



FONTE: Hellier (2001)

A matéria transferida ao lóbulo de Roche da primária possui grande momento angular, de forma que seu fluxo não incide diretamente sobre a anã branca descrevendo uma trajetória balística (Figura 3). O fluxo de matéria terá um raio de máxima aproximação do centro da primária dado por $r_{min} = 0,0488aq^{-0,464}$, com $0,05 < q < 1$ (Lubow e Shu, 1975). Nas variáveis cataclísmicas o raio da anã branca é menor que r_{min} e, portanto, o fluxo de matéria a circunda, ao invés de se chocar diretamente. No entanto, este fluxo colide consigo mesmo, dissipando a energia cinética, circularizando e assumindo a forma de um disco. Este disco é conhecido como disco de acreção. Como em órbitas menores a velocidade angular é maior, ocorre uma fricção interna entre os agregados de matéria que orbitam a estrela primária. Isto faz com que o gás aquecido, libere energia e perca momento angular, de modo que parte dele assumirá órbitas cada vez menores. O disco continua perdendo momento angular até que seu limite interno se encontre com a anã branca. Com isto temos a matéria da secundária passando para a anã branca até ser depositada em uma região conhecida como *boundary layer*. A região em que o fluxo que sai da secundária se choca com a parte externa do disco de acreção, em velocidade supersônica, é conhecida como *bright spot* que, em alguns casos, tem o brilho comparável a todo o restante do disco.

1.1.2 Perda de Momento Angular e Transferência de matéria

O mecanismo fundamental que rege a evolução de uma Variável Cataclísmica é a perda de momento angular. Assumiremos, que seja um sistema isolado, isto é, sem influência de fatores externos. Assim, o momento angular do sistema é conservado. A secundária, que é a estrela de menor massa, está afastada do centro de massa, com isso o material transferido acaba se aproximando do centro de massa, perdendo

momento angular e aumentando a separação do sistema binário para compensar a conservação do momento angular. O aumento da separação orbital faz com que a secundária perca o contato com seu lóbulo de Roche, cessando a transferência de massa.

Para que a transferência de massa seja estável em Variáveis Cataclísmicas, a secundária deve, continuamente, preencher o seu lóbulo de Roche. Isso pode ocorrer de duas formas. Uma forma seria a evolução da secundária para gigante vermelha. No entanto, isto não pode explicar o que ocorre na maioria das variáveis cataclísmicas, por apresentarem uma secundária de massa menor que uma massa solar, cujas escalas de tempo evolutivas são muito longas.

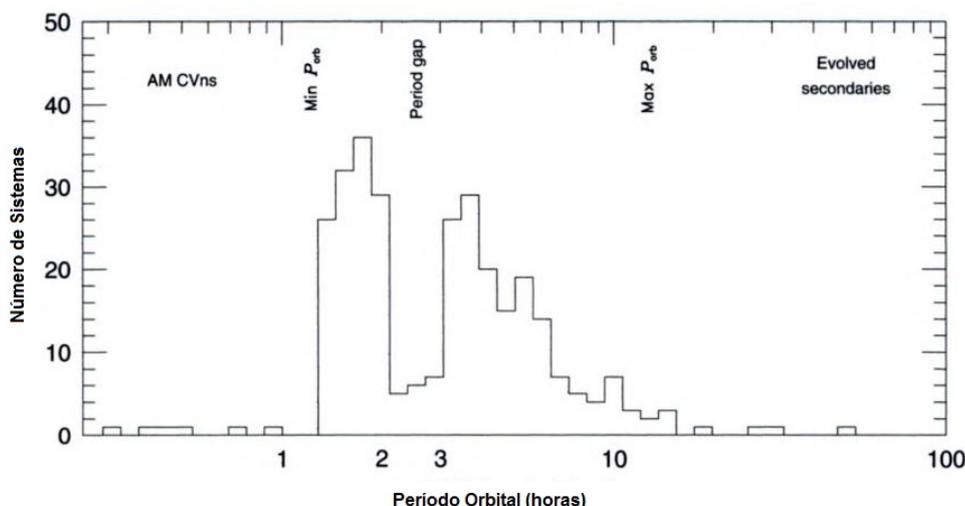
A outra possibilidade é a perda de momento angular do sistema. Isto reduz a órbita e, portanto, o lóbulo de Roche da secundária, permitindo que retorne a transferência de matéria. Há dois mecanismos principais pelos quais as variáveis cataclísmicas podem perder momento angular, a *radiação gravitacional* e o *freamento magnético*.

A teoria da relatividade geral nos diz que a presença de matéria provoca uma curvatura no espaço. O movimento orbital de duas estrelas faz com que ocorram alterações rítmicas dessa curvatura, que se propagam em forma de ondas. Este fenômeno é a radiação gravitacional. A energia usada para produzir as ondas gravitacionais é extraída do movimento orbital, provocando a perda de momento angular no sistema. O efeito dessa radiação é pequeno, mas, à medida que o sistema adquire menores órbitas, sua velocidade orbital aumenta tornando o efeito mais intenso. Dessa forma a perda de momento angular por este efeito torna-se significativa para períodos orbitais menores.

Já o freamento magnético é causado pela interação do campo magnético da estrela secundária com as partículas ionizadas expulsas pelo seu vento estelar. Como as partículas estão atreladas ao campo magnético, são forçadas a se moverem junto com a secundária em sua rotação, sofrendo uma aceleração antes de abandonarem a influência do campo e serem liberadas no espaço, carregando consigo uma quantidade significativa de momento angular da secundária. Como a secundária tem sua rotação sincronizada com o movimento orbital do sistema, isto reduz o momento angular do sistema por inteiro.

Durante a maior parte de sua evolução, o período orbital de uma VC vai gradativamente diminuindo. No entanto, não podemos analisar a evolução de uma VC, pois sua duração é da ordem de 10^6 anos. Contudo podemos analisar estatisticamente a distribuições dos períodos orbitais, de centenas de variáveis cataclísmicas. Podemos

Figura 4 - Distribuição de períodos orbitais de variáveis cataclísmicas.



FONTE: Adaptado de Hellier (2001)

ver na Figura 4 a distribuição dos períodos orbitais das variáveis cataclísmicas. Podemos observar que há uma queda súbita no número de objetos com períodos entre 2 e 3 horas. Esta deficiência de objetos observados neste intervalo recebe o nome de *period gap*. O *period gap* define duas regiões no histograma: a região de sistemas com períodos acima de 3h, associadas ao regime de freamento magnético, e os sistemas com períodos menores que 2h, associada ao regime de radiação gravitacional. À medida em que o período orbital diminui, muda-se gradualmente do regime de freamento magnético para o de radiação gravitacional. Quando o sistema binário chega a um período próximo de 80 min, a estrela secundária perdeu massa suficiente para torná-la degenerada e ela, portanto, responde à diminuição de sua massa com o aumento do seu raio, ao contrário do que ocorre nas estrelas normais. Isso provoca uma inversão na derivada temporal do período orbital e o sistema então evolui para períodos orbitais maiores, definindo 80 min como o mínimo dos períodos, como observado na Figura 4.

Podemos ver na Figura 4 que o mecanismo de freamento magnético perde eficiência para sistemas com períodos próximos a 3h. Uma explicação possível é o enfraquecimento do campo magnético da secundária. O núcleo da secundária deixa de ser radiativo, tornando-se convectivo (Connon Smith, 2007). A aparente deficiência de objetos com períodos entre 2h e 3h está relacionada à interrupção da transferência de matéria, pois a secundária sofre uma contração, destacando-se do seu lóbulo de Roche. Sem essa transferência o disco de acreção desaparece e a luminosidade do sistema é reduzida, tornando-se quase indetectável. Próximo ao período de 2h a secundária volta a ter contato com o seu lóbulo de Roche, retomando a transferência de matéria e reconstruindo o disco de acreção (Warner, 1995).

1.1.3 Classes de Variáveis Cataclísmicas

As variáveis cataclísmicas são basicamente classificadas de acordo com a sua variabilidade fotométrica. As VCs apresentam variabilidade fotométrica com diversas amplitudes, com escalas de tempo de minutos a anos. Estas variabilidades estão associadas a distintos fenômenos físicos dos sistemas. A seguir vamos descrever as características das principais classes de variáveis cataclísmicas.

As *Novas* são VCs que apresentam uma variação fotométrica de grande amplitude, tipicamente 8-15 mag, num intervalo de 1-3 dias, com um declínio lento. Essa variação é causada por uma erupção que ocorre na anã branca devido ao acréscimo de matéria da secundária, que cria sobre a superfície da primária uma camada de hidrogênio. O aumento da temperatura e pressão na base da camada de hidrogênio acumulado provoca a ignição nuclear deste material, iniciando a queima do hidrogênio através do ciclo CNO. A extrema pressão de radiação produzida pela queima nuclear rápida ejeta a camada superior, criando uma camada em expansão ao redor da anã branca. As *novas* são todas muito semelhantes, diferindo na taxa de ascensão e, principalmente no declínio da erupção. A taxa de declínio define as "classes de velocidade".

Sistemas nos quais foram observadas erupções de Novas mais de uma vez são conhecidos como *novas recorrentes*. São contabilizados cerca de uma dezena destes objetos, com intervalos de recorrência a partir de 10 anos (Connon Smith, 2007). Para sistemas que se registraram apenas uma única erupção, usamos o termo *novas clássicas*. A maior parte das novas recorrentes não são variáveis cataclísmicas típicas, mas sistemas com o período orbital de dias a centenas de dias e suas estrelas secundárias são gigantes, ou estão em processo para se tornarem gigantes.

Existe uma classe de VCs denominadas *novas anãs* que também sofrem um aumento repentino de brilho mas com uma intensidade menor (3-5 mag) do que a intensidade de novas clássicas e a intervalos de semanas ou meses. O mecanismo de uma nova anã é diferente das novas clássicas, já que o aumento de brilho é associado ao aumento da luminosidade do disco de acreção. A causa de sua erupção está associada a instabilidades termodinâmicas do disco de acreção ou a variações na taxa de transferência de matéria da secundária.

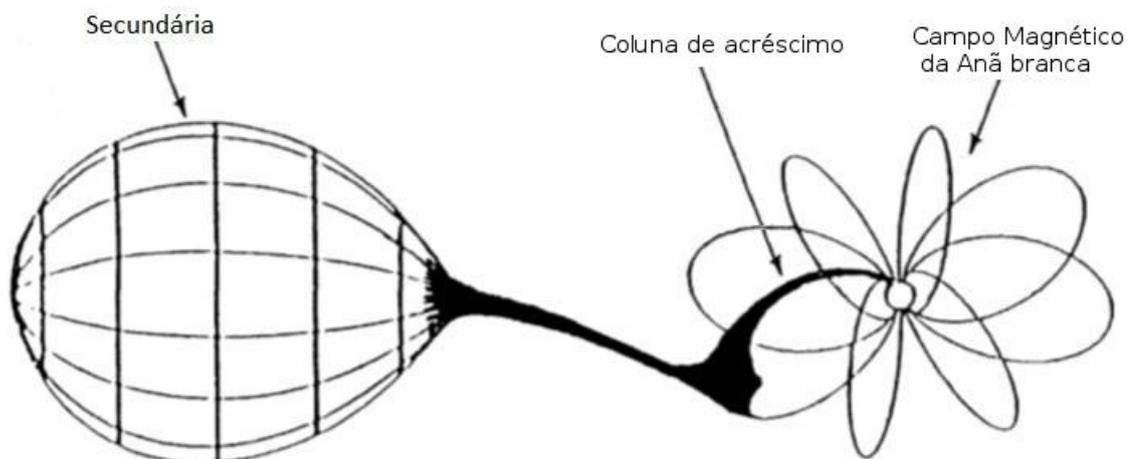
As *novas-likes* compõe uma classe de VCs onde não foram observados explosões de Novas. Elas tem uma taxa de transferência de matéria alta o suficiente para que o disco de acreção deixe de alternar entre estados de quiescência e erupção, mantendo-se em um estado de "erupção permanente"(Connon Smith, 2007).

Outra classe das variáveis cataclísmicas são as *magnéticas*, classificadas de acordo com a intensidade do campo magnético da anã branca. Para campos magnéticos intermediários, temos as *Polares Intermediárias*, nas quais o disco de acreção é truncado para raios internos ao raio da magnetosfera da anã branca, levando a matéria a ser acretada através das linhas de campo magnético até os polos magnéticos da primária. Caso o campo seja forte o suficiente para desfazer completamente o disco de acreção, chamamos esta classe de *Polares*. A matéria que flui da secundária para a anã branca é acretada por uma coluna de acreção orientada pelo campo magnético da anã branca.

1.2 Polares

As VCs polares possuem anãs brancas com campos magnéticos muito intensos ($B > 10$ MG). Já foram descobertos 116 sistemas polares (Ritter e Kolb, 2011 e RK Catalogue¹), sistemas em sua maioria abaixo do *period gap*. Nas polares não se forma o disco de acreção. O material transferido da estrela secundária chega à anã branca através de uma coluna de acreção, orientada pelo campo magnético da primária (Fig.5). A evolução das polares não ocorre da mesma forma que nas VCs não-magnéticas, pois o freamento magnético não é muito efetivo. Na seção 1.2.2 explicaremos a evolução das polares.

Figura 5 - Modelo de sistema polar, onde a secundária transfere matéria através de uma coluna de acreção devido ao intenso campo magnético da anã branca.



FONTE: Adaptado de Cropper (1990).

¹<http://physics.open.ac.uk/RKcat/>

1.2.1 Componentes do sistema

As estrelas secundárias nas VCs Polares, assim como na maioria das VCs, são estrelas de sequência principal de baixa massa que preenchem o seu lóbulo de Roche. Suas massas da ordem de $0,075M_{\odot}$ a $0,5M_{\odot}$ com temperaturas de 3000K a 6000K. O campo magnético das secundárias é de 10^2G a 10^3G . O campo magnético irá auxiliar a estrela primária a entrar em sincronia com o sistema devido a interação entre os campos das componentes (Cropper, 1990).

A estrela primária é uma anã branca com massa variando entre $0,3M_{\odot}$ a $1,3M_{\odot}$ e um raio de cerca de 10^4 km. Possuem um campo magnético entre 7MG a 230MG (Ferrario, de Martino e Gänsicke, 2015). Estas estrelas têm sua rotação sincronizada com o período orbital devido ao torque sofrido pela interação dos campos magnéticos das componentes do sistema.

1.2.2 Evolução

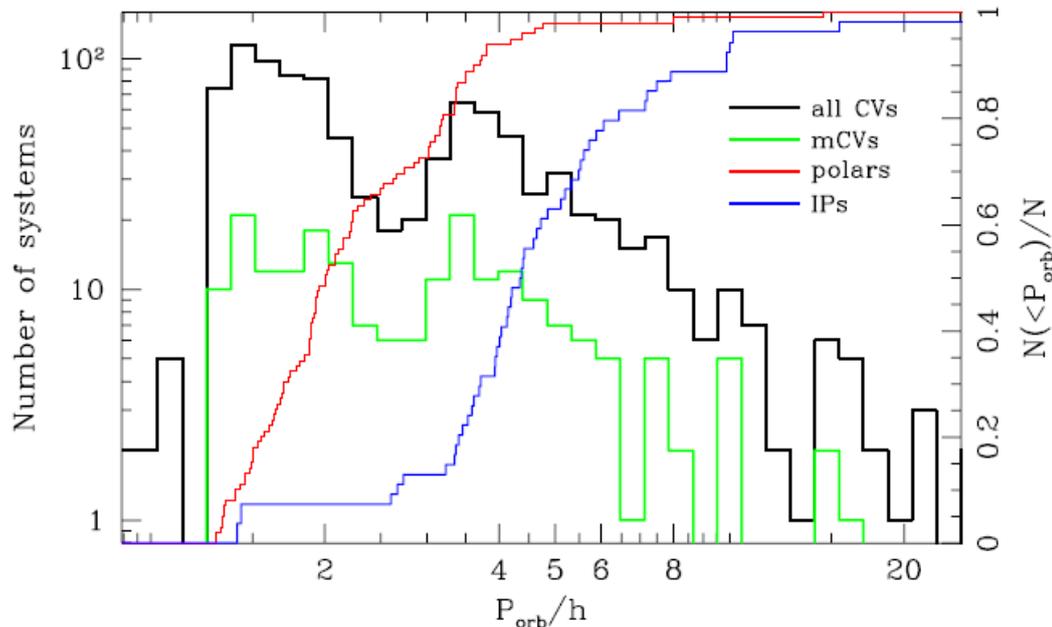
As Polares possuem uma anã branca com rotação sincronizada, ou próximas de sincronia, com o período orbital (Wickramasinghe e Wu, 1994). Algumas polares estão próximas de sincronia ou saíram de sincronia devido a explosões de nova, nestes casos a sincronia irá se re-estabelecer num curto período de tempo (cerca de 10^3 a 10^4 anos, Schmidt e Stockman, 1991).

Como consequência do intenso campo magnético, a magnetosfera da anã branca afeta o campo magnético da secundária. As linhas de campo magnético da secundária irão retornar para a superfície da estrela ou se conectarão com o campo magnético da anã branca, diminuindo a efetividade do freamento magnético. Para que ocorra o freamento magnético é necessário linhas de campo magnético abertas, ou seja, as linhas de campo magnético não podem retornar para a estrela secundária fechando um circuito, isso implica que não haverá um arraste devido ao vento estelar, diminuindo a eficiência da perda de momento angular. Esta eficiência depende de um fluxo magnético em linhas de campo aberto e não apenas da presença de um campo forte na superfície da estrela. A matéria transferida para a anã branca só provoca uma redistribuição do momento angular dentro do sistema. Então, nas polares a perda de momento angular é dominada pelo mecanismo de radiação gravitacional.

Se considerarmos o histograma da distribuição de períodos orbitais das polares e polares intermediárias em conjunto, encontramos uma distribuição (Figura 6) similar à obtida para as VCs em geral, mostrada na Figura 4. Podemos ver que existe uma deficiência de objetos com períodos entre 2h e 3h e que as polares intermediárias estão, em sua maioria, acima do *period gap*, enquanto as polares estão concentradas

abaixo do *period gap*.

Figura 6 - Distribuição de períodos orbitais de todos os sistemas VCs (preto) e dos sistemas VCs magnéticos (verde). A linha azul representa a distribuição cumulativa das PIs e a vermelha a distribuição cumulativa das polares.



FONTE: Pretorius (2014).

Chanmugam e Ray (1984) sugeriram que as polares intermediárias, ao evoluírem para períodos menores, se tornam polares. Para isto ocorrer a anã branca da polar intermediária teria que ter um campo magnético forte o suficiente para entrar em sincronia com o período orbital do sistema. Essa sincronização depende do momento magnético da primária $\mu_1 = BR_{ab}^3$, sendo B o campo magnético da anã branca e R_{ab} o raio da anã branca. De acordo com isto podemos estabelecer, segundo Cropper (1990), que:

- se $\mu_1 \lesssim 10^{31} Gcm^3$ o campo magnético não é suficiente para formar um canal de acreção, tendo pouco efeito no sistema;
- se $10^{31} \lesssim \mu_1 \lesssim 10^{33} Gcm^3$ os sistemas continuam a ser polares intermediárias mesmo que evoluam para períodos menores;
- se $10^{33} \lesssim \mu_1 \lesssim 10^{35} Gcm^3$ as polares intermediárias poderão evoluir para polares;
- e todos os sistemas com $\mu_1 \gtrsim 10^{35} Gcm^3$ serão polares.

O principal problema para este cenário evolutivo é que o campo magnético da anã branca das polares intermediárias ($B \lesssim 10MG$) é muito mais fraco do que das anãs branca das polares ($B \approx 10 - 100MG$). Cumming (2002) propôs que o campo magnético da anã branca deve aumentar de acordo com a acreção de matéria, levando ao cenário de evolução descrito anteriormente. Zhang, Wickramasinghe e Ferrario (2009) aperfeiçoaram os cálculos considerando uma acreção não esférica e concluíram que o campo magnético não é alterado devido à acreção. De fato a evolução das VCs magnéticas ainda é um tema não totalmente entendido, não sendo possível estabelecer uma evolução clara para as VCs magnéticas até o momento (Norton et al., 2008; Pretorius, 2014).

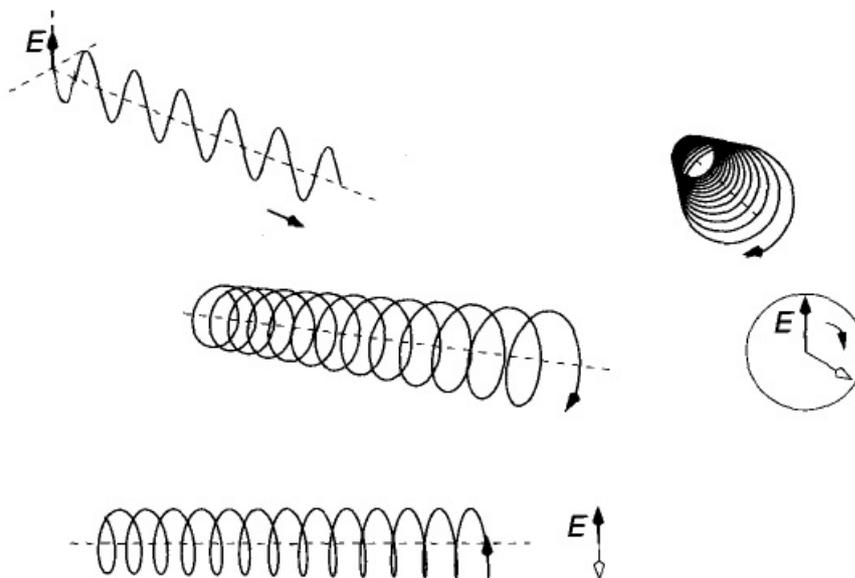
1.2.3 Acreção nas polares

Descrevemos na seção 1.1.2 os mecanismos de perda de momento angular que regem a transferência de matéria da secundária para a primária em Variáveis Cataclísmicas em geral, e na seção 1.2.2 como estes mecanismos atuam em sistemas polares. Nesta seção abordaremos como a matéria transferida da secundária pelo ponto interno de Lagrange (L_1) chega à primária.

A transferência de matéria para a primária dependerá de dois fatores: pressão magnética exercida pelo campo da anã branca e a pressão que o fluxo de matéria sofre por este campo (pressão RAM). A uma distância onde a pressão magnética não afeta o fluxo de matéria, este fluxo descreve uma trajetória balística. A medida que o fluxo se aproxima da anã branca a pressão RAM começa a afetar o fluxo de matéria formando uma região de acoplamento com as linhas de campo magnético. Esta região de acoplamento, ou de estagnação, terá uma extensão radial como consequência da variabilidade de densidade do fluxo transferido. Para densidades altas a matéria acoplará em regiões próximas da anã branca, enquanto que para densidades baixas o acoplamento se dá a maiores distâncias.

A matéria conduzida pelas linhas de campo magnético para as regiões polares da anã branca é ionizada, e por isso, apresenta um movimento espiral ao redor das linhas do campo magnético devido a força de Lorentz. Esta força faz com que a partícula se mova circularmente pelas linhas de campo magnético e a resultante do movimento circular e da trajetória da partícula através do campo magnético é uma trajetória espiral com uma aceleração uniforme. Estas partículas em movimento acelerado emitem radiação. Nas polares essas partículas atingem velocidades não relativísticas e a radiação emitida é conhecida como radiação ciclotrônica. A radiação ciclotrônica é polarizada, isto é, os fótons emitidos por essa radiação apresentam uma direção de campo elétrico definida (Fig. 7).

Figura 7 - Oscilação perpendicular do campo elétrico de um fóton em relação ao eixo de propagação (superior esquerdo). Elétron na presença de linhas de campo magnético tem um movimento espiral com frequência ciclotrônica através das linhas de campo magnético produzindo a radiação ciclotrônica. Quando vistos de lado (inferior) produz fótons com polarização linear. Vistos diretamente (direita) a polarização dos fótons é circular



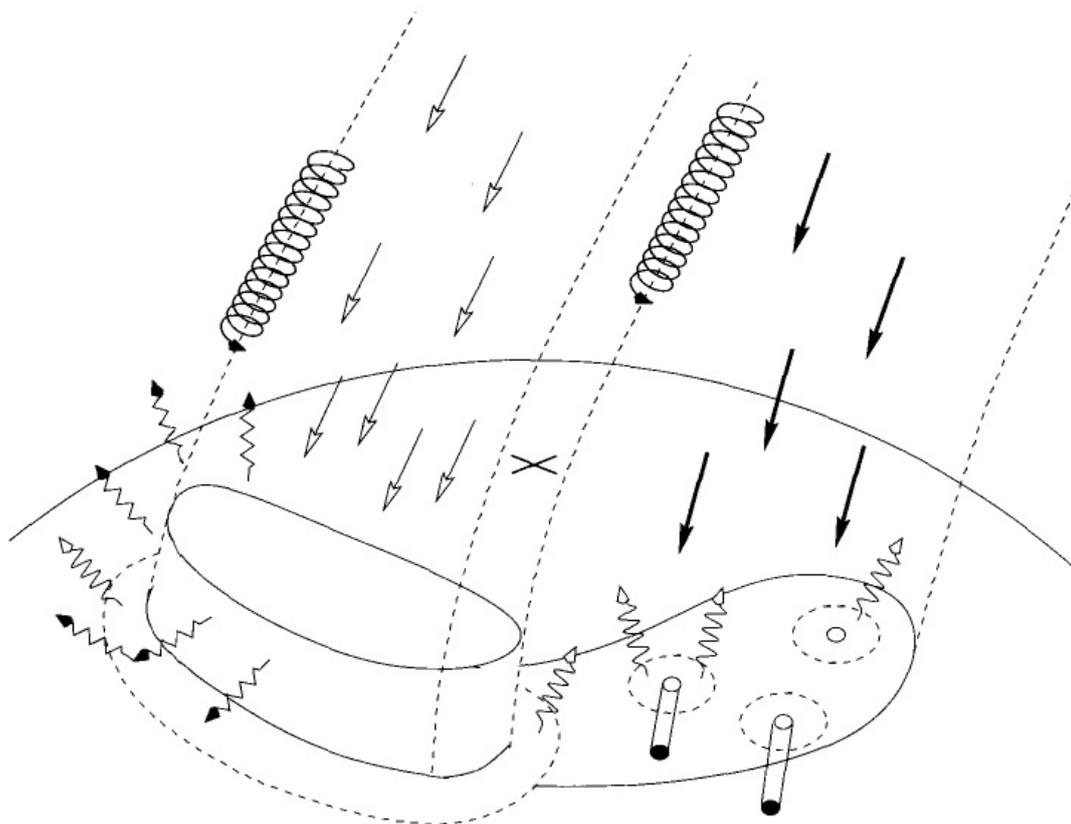
FONTE: Hellier (2001).

As ondas eletromagnéticas são mudanças periódicas de campos elétricos e magnéticos no espaço e no tempo. Em qualquer ponto de um feixe de luz, o campo magnético é sempre perpendicular ao campo elétrico. Ambos os campos elétricos e magnéticos oscilam num plano perpendicular à direção de propagação do feixe de luz. Caso o vetor resultante do campo elétrico oscile linearmente no plano perpendicular à direção de propagação da radiação emitida, dizemos que essa radiação é plano polarizada ou que a radiação tem uma polarização linear. Quando são duas ondas eletromagnéticas plano polarizadas em dois planos perpendiculares simultaneamente, os campos elétricos são adicionados de acordo com as regras da adição de vetores, criando uma sobreposição das ondas. As propriedades da onda eletromagnética resultante dependem da diferença de fase e intensidades das ondas que as compõem. Quando duas ondas plano polarizada em dois planos perpendiculares encontram-se fora de fase a onda resultante da sobreposição, não será mais plano polarizada. O resultado da sobreposição é uma onda eletromagnética que terá um vetor resultante do campo elétrico descrevendo uma elipse, onde o círculo é um caso especial em que as ondas tem a mesma amplitude. Essa característica é conhecido como polarização circular

A polarização é uma ferramenta importante para estudar polares pois através dela podemos determinar o ângulo de inclinação entre a linha de visada e o eixo magnético da anã branca, e como ele varia com o período orbital. A radiação ciclotrônica é responsável pela maior parte da emissão contínua do óptico das polares.

A região de acréscimo de matéria sobre a superfície da anã branca fica próxima a um dos (ou ambos) polos magnéticos, e é a fonte da maior parte da emissão de radiação em todos os comprimentos de onda. O material, orientado pelo campo magnético, chega à anã branca através de uma coluna de acréscimo que se estende da região de estagnação até a fotosfera da anã branca. O material depositado na região de estagnação é conduzido para o polo magnético da anã branca através das linhas de campo magnético (Figura 8). Ao se mover por um campo magnético as partículas emitem radiação ciclotrônica. As partículas possuem grande energia cinética ao chegar no polo magnético da anã branca. As partículas de baixa densidade, ao colidirem com a superfície da anã branca, convertem a energia cinética em energia térmica criando uma coluna que se expande adiabaticamente por $\approx 0,1 R_{AB}$ (Cropper, 1990) acima da superfície. O material que chega, choca-se com o topo da coluna diminuindo a velocidade em quatro vezes e aumentando a densidade no mesmo fator. A energia cinética aquece o material da coluna a temperaturas de $\approx 2 \times 10^8$ K, aumentando a colisão de elétrons e íons que resulta na emissão de raio-X pelo processo de *bremsstrahlung*. As partículas de alta densidades, por sua vez, ao se chocarem com a superfície da anã branca penetram na superfície, liberando energia na forma de raios-X moles.

Figura 8 - Região de choque da coluna de acréscimo. As partículas em movimento pelas linhas de campo descrevem trajetórias espirais emitindo radiação ciclotrônica. O polo da anã branca é representado pelo X. As setas sem preenchimento são as partículas de baixa densidade que ao colidir com a anã branca cria uma nevoa próxima da superfície emitindo raios-X duros (setas onduladas pretas) e próximo da superfície raios-X moles (setas onduladas brancas). As setas preenchidas são partículas de alta densidade que ao se chocarem com a anã branca penetram na superfície emitindo raios-X moles.



FONTE: Hellier (2001).

2 Projeto de busca por novas Polares

2.1 Motivação para o projeto

A descoberta de novas Variáveis Cataclísmicas ganhou grande impulso com o início da era de grandes *surveys* automatizados. Além da óbvia importância dos *surveys* de raios-X realizados por satélites, como por exemplo o ROSAT, na questão da descoberta de VCs magnéticas, alguns *surveys* realizados na superfície da Terra também contribuem para o aumento da amostra de várias classes de VCs. Uma fração considerável destes *surveys* são baseados na identificação de linhas de emissão espectrais, especialmente das linhas de Balmer, como no caso do *Hamburg Survey* (Hagen et al., 1995) e o IPHAS (Witham et al., 2007). Outros *surveys* são fundamentados em cores fotométricas, como o SDSS (York et al., 2000), que descobriu centenas de VCs, em sua maioria novas anãs (por exemplo Szkody, S. F. Anderson, Brooks et al., 2011). Estes *surveys* fornecem uma grande amostra de candidatas a VCs que, para serem confirmadas e classificadas, demandam individualmente de observações espectroscópicas e fotométricas detalhadas.

Esta forma de descoberta de VCs sofrerá um impacto gigantesco com o início das operações do *Large Synoptic Survey Telescope* - LSST - previsto para 2021. O LSST será um telescópio de 8,4 m dedicado a imagear completamente o céu visível no hemisfério sul, com uma cadência de algumas noites, durante 10 anos e atingindo uma profundidade de 24 mag nas imagens individuais (27 mag nas imagens combinadas). A expectativa é que o LSST encontre bilhões de transientes de todos os tipos.

2.2 O *Catalina Real-Time Transient Survey*

O *Catalina Real-Time Transient Survey* (CRTS; Drake, Djorgovski, A. Mahabal et al., 2009) é um *survey* projetado para a identificação de transientes fotométricos e é composto de três *surveys* distintos - o *Catalina Schmidt Survey* (CSS), o *Mount Lemmon Survey* (MLS) e o *Siding Spring Survey* (SSS) - que repetidamente varrem uma área combinada de 30 000 graus quadrados de céu em ambos hemisférios, até um limite de 19-21 mag na banda V. Este *survey* já encontrou mais de mil candidatas a VC, que são tornadas públicas imediatamente em seu *website*¹. Das candidatas a CVs descobertas pelo CRTS, a maioria são novas anãs, pois seu critério de seleção de transientes utiliza um limite inferior de 2 mag de amplitude para um registro efetivo, o que favorece a detecção de erupções de novas anãs, que costumam ter 2 mag como amplitude mínima.

¹<http://crts.caltech.edu>

Tabela 1 - Sistemas observados no projeto de espectros exploratórios.

Objeto	AR (J2000)	Dec (J2000)	Data da obs.	Telesc.	Classif.
CSS091009:010412-031341	01:04:12	-03:13:41	2012 Ago 25	SOAR	Magnética
MLS110207:014023+020639	01:40:23	+02:06:39	2012 Ago 25	SOAR	Espec. Abs.
CSS091215:021311+002153	02:13:11	00:21:53	2012 Set 09	SOAR	AGN
MLS110213:022733+130617	02:27:33	+13:06:17	2012 Set 09	SOAR	Magnética
CSS071206:031525-014051	03:15:25	-01:40:51	2012 Nov 13	SOAR	AGN
CSS090922:032603+252534	03:26:03	25:25:34	2012 Nov 20	SOAR	DN
CSS090919:034617+293540	03:46:17	+29:35:40	2012 Mar 26	OPD	Espec. Abs.
SSS110902:034833-322007	03:48:33	-32:20:07	2012 Set 03-04	OPD	Espec. Abs.
CSS091109:035759+102943	03:57:59	+10:29:43	2012 Nov 12	SOAR	Magnética
MLS101203:045625+182634	04:56:25	+18:26:34	2012 Nov 13	SOAR	Magnética
XMMSL1 J063045.9-603110	06:30:45.45	-60:31:12.8	2012 Nov 12	SOAR	Nova
MLS101226:072033+172437	07:20:33	+17:24:37	2012 Nov 12	SOAR	Magnética
1RXS J072103.3-055854	07:21:02.87	-05:59:20.42	2012 Mai 01	SOAR	DN erup
MLS120127:085402+133633	08:54:02	+13:36:33	2012 Dez 15	SOAR	Magnética
MLS110210:100054+065557	10:00:54	+06:55:57	2012 Mar 26	OPD	Espec. Abs.
1RXS J100211.4-192534	10:02:11.5	-19:25:36	2012 Mai 30	SOAR	Magnética
CSS120324:101217-182411	10:12:17	-18:24:11	2012 Mai 30	SOAR	Magnética
SSS110504:101240-325831	10:12:40	-32:58:31	2012 Abr 21	SOAR	DN
CSS110225:112749-054234	11:27:49	-05:42:34	2012 Mar 18	SOAR	Magnética
CSS071218:124027-150558	12:40:27	-15:05:58	2012 Mar 17	SOAR	Outro
MLS110329:125118-020208	12:51:18	-02:02:08	2012 Abr 23	SOAR	AGN
MLS110301:135717-093239	13:57:17	-09:32:39	2012 Mar 18	SOAR	Outro

SSS110724:135915-391452	13:59:15	-39:14:52	2012 Abr 22	SOAR	DN
MLS110301:140203-090329	14:02:03	-09:03:29	2012 Abr 23	SOAR	Outro
MLS100617:140447-152226	14:04:47	-15:22:26	2012 Mar 17	SOAR	AGN
SSS100507:144833-401052	14:48:33	-40:10:52	2012 Mar 26	OPD	Obj. Verm.
CSS100216:150354-220711	15:03:54	-22:07:11	2012 Mar 16	SOAR	Outro
MLS100519:151759-030919	15:17:59	-03:09:19	2012 Mar 26	OPD	Espec. Abs.
MLS110526:151937-130602	15:19:37	-13:06:02	2012 Mar 18	SOAR	Espec. Abs.
MLS110609:160907-104013	16:09:07	-10:40:13	2012 Abr 22	SOAR	Magnética
CSS080606:162322+121334	16:23:22	+12:13:34	2012 Abr 22	SOAR	DN
SSS100804:163911-235804	16:39:11	-23:58:04	2012 Set 03-04	OPD	Obj. Verm.
1RXS J1719-4100	17:19:35.88	-41:00:53.6	2012 Set 04	OPD	Magnética
CSS110623:173517+154708	17:35:17	+15:47:08	2012 Abr 23	SOAR	DN
1RXS J174320.1-042953	17:43:20.29	-04:29:57.09	2012 Mar 16	SOAR	Magnética
SSS110428:185417-572705	18:54:17	-57:27:05	2012 Set 03	OPD	Espec. Abs.
1RXS J192926.6+202038	19:29:27.82	+20:20:35.36	2012 Abr 23	SOAR	DN
SSS110625:194030-633056	19:40:30	-63:30:56	2012 Set 03	OPD	Obj. Verm.
SSS100805:194428-420209	19:44:28	-42:02:09	2012 Abr 22	SOAR	Magnética
SSS110526:195648-603430	19:56:48	-60:34:30	2012 Abr 21	SOAR	Magnética
SSS110707:202249-684329	20:22:49	-68:43:29	2012 Set 03	OPD	Obj. Verm.
USNO-A2.0 0825-18396733	20:31:37.59	-0:05:11.2	2012 Mai 19/Jun 24	SOAR	Magnética
SSS110526:204247-604523	20:42:47	-60:45:23	2012 Ago 10	SOAR	DN erup
MLS100706:204358-194257	20:43:58	-19:42:57	2012 Ago 10	SOAR	DN
MLS111021:204455-162230	20:44:55	-16:22:30	2012 Set 03	OPD	Espec. Abs.
MLS101102:205408-194027	20:54:08	-19:40:27	2012 Ago 10	SOAR	DN
CTCV J2056-3014	20:56:52.04	-30:14:38.2	2012 Set 04	OPD	Magnética

CSS110513:210846-035031	21:08:46	-03:50:31	2012 Mai 19/Jun 24	SOAR	DN
MLS100620:213227-150523	21:32:27	-15:05:23	2012 Ago 10	SOAR	Espec. Abs.
CSS100624:220031+033431	22:00:31	+03:34:31	2012 Ago 14	SOAR	DN
1RXS J222335.6+074515	22:23:34.16	+07:45:19.27	2012 Ago 25	SOAR	DN
MLS100906:223034-042347	22:30:34	-04:23:47	2012 Ago 25	SOAR	AGN
SSS110720:224200-662512	22:42:00	-66:25:12	2012 Set 03-04	OPD	Magnética
CSS111021:231909+331540	23:19:09	+33:15:40	2012 Set 04	OPD	Magnética

AGN - Núcleo Ativo de Galáxia, DN - Nova Anã, DN erup - Nova Anã em erupção, Nova - Erupção de Nova, Espec. Abs. - Espectro de absorção, Magnética - Candidatas a Polar ou Polar Intermediária, Obj. Verm. - Espectro com linhas intensas no vermelho, Outro - Não classificado nas demais.

2.3 Projeto Observacional de Busca por Polares e CBSS

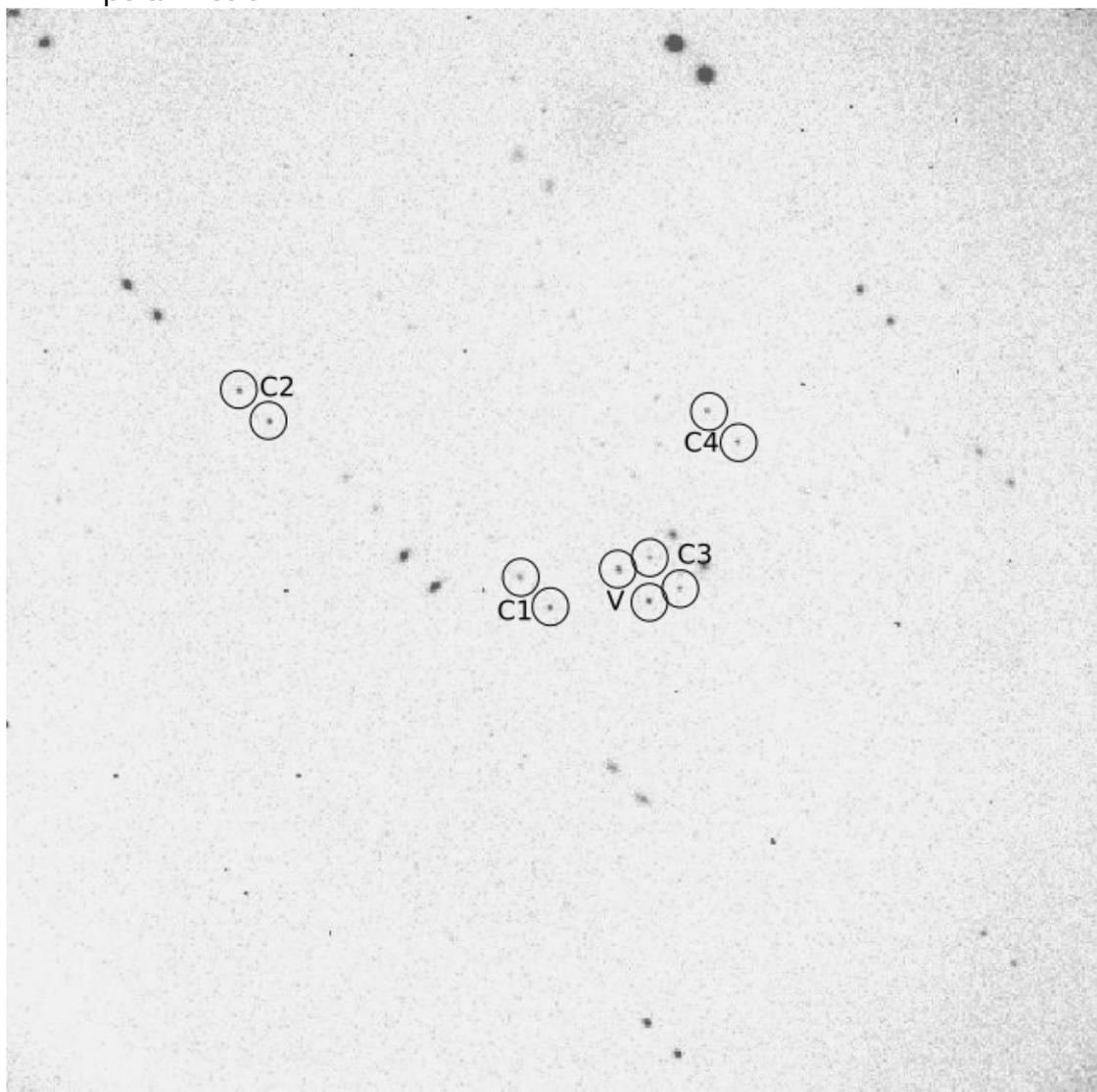
Em 2012 o grupo de pesquisa no qual me insiro iniciou um projeto observacional, com os telescópios SOAR (projetos SO2012A-023 e SO2012B-007) e P&E do OPD/LNA (projetos OP2012A-028 e OP2012B-006), com o objetivo de procurar por assinaturas espectroscópicas de alta ionização associadas à acreção de matéria em objetos selecionados principalmente do CRTS. Este projeto visava particularmente a descoberta de novos objetos das classes dos polares e das *Close Binary Supersoft Sources* (CBSS), estes últimos sendo possíveis progenitores de Supernovas do Tipo Ia.

Nos dois semestres deste projeto observacional (2012 A e B), o grupo obteve espectros exploratórios de 54 alvos (Tab. 1), cuja seleção foi baseada na análise das suas curvas de luz de longo prazo do CRTS, quando disponíveis, escolhendo objetos com curvas similares às de VCs magnéticas, mas de maneira a evitar erupções de novas anãs. Outro critério de seleção foi o registro de detecção de emissão em raios-X. O objetivo dos espectros exploratórios era a identificação de linhas de emissão de Hell 4686 \AA e/ou a presença do decremento de Balmer invertido, características de alta ionização associadas à acreção de matéria em objetos compactos e que restringiriam a natureza (CBSS ou VC magnética) das candidatas. Numa segunda fase deste projeto, após a análise dos espectros exploratórios, os objetos mais promissores estão sendo alvo de monitoramentos fotométricos, espectroscópicos e polarimétricos, também no SOAR (SO2013A-004, SO2014A-003 e SO2014B-012) e OPD (OI2013A-049, OP2014A-020, OP2014A-024 e OP2014B-014), para análise detalhada de suas propriedades. Como resultado esperamos aumentar a amostra de polares e de CBSS com parâmetros físicos e geométricos determinados.

Este trabalho de mestrado apresenta resultados deste *follow-up* observacional realizado para o sistema CSS110225:112749-054234 (daqui em diante simplesmente CSS110225). Este transiente foi descoberto pelo CRTS em 25 de fevereiro de 2011, quando transitou de um estado baixo de brilho (com magnitude média abaixo do limite de detecção de 20,5 mag) para um estado alto (18,5 mag em média), nas coordenadas AR = 11:27:49, DEC = -05:42:34 (a *finding chart* é apresentada nas Figuras 9 e 10). Sua curva de luz (Fig. 11), obtida pelo CRTS com observações desde janeiro de 2005, mostra que o estado baixo teve uma duração de cerca de 4 anos. Eventuais incursões para o estado alto neste período podem não ter sido registradas pelo CRTS. No estado alto, a amplitude de variação é de 1,5 mag, sendo este o estado de brilho em que este objeto está desde, pelo menos, janeiro de 2011. O SDSS registra uma fonte puntiforme fraca de cor azul nestas coordenadas (com $u = 20.00, g = 20.12, r = 20.09, i = 20.28$ e $z = 20.15$ no Data Release 8), e o CRTS pré-classificou este objeto como uma

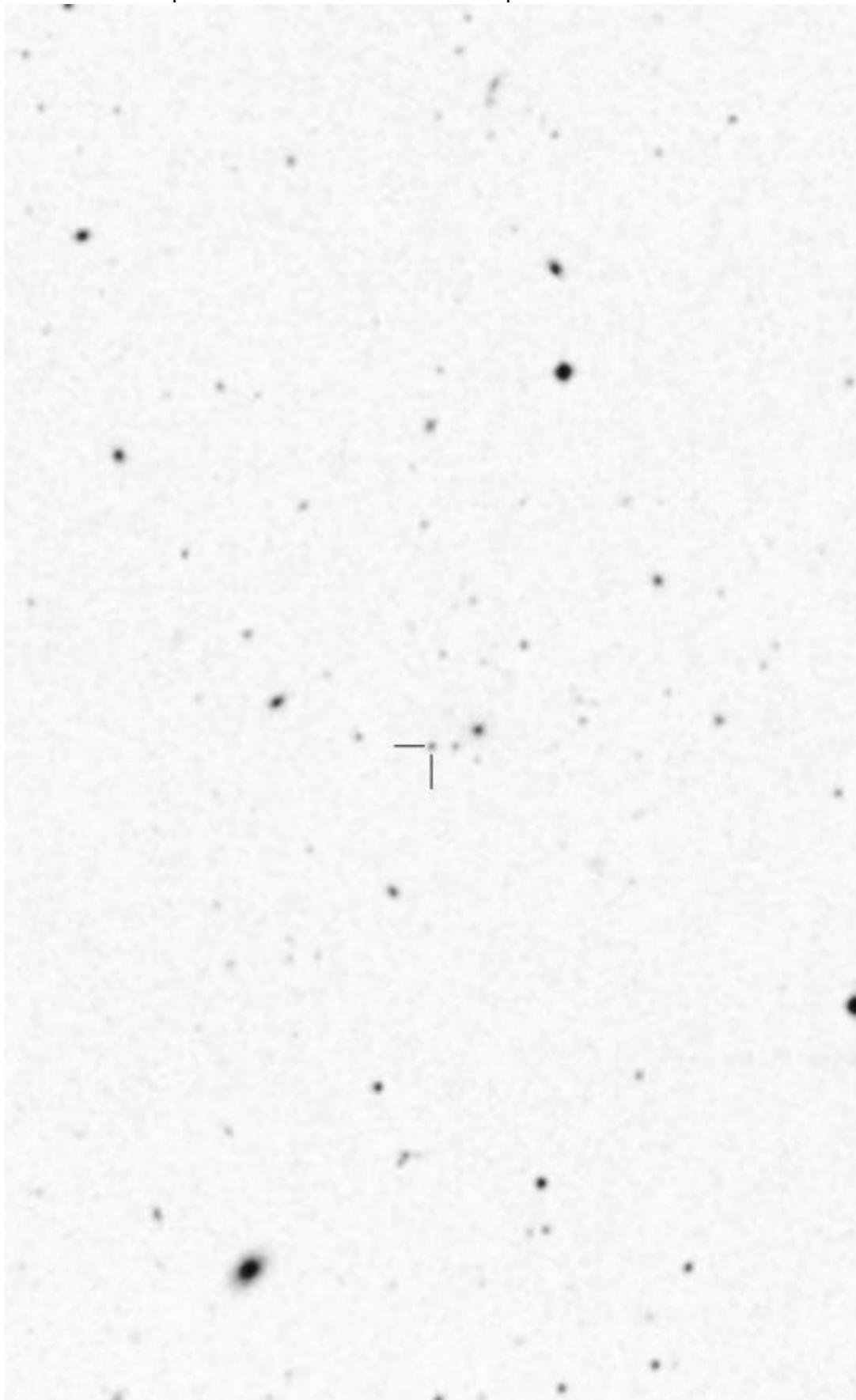
possível polar com base na sua variabilidade fotométrica bem como na sua cor obtida pelo SDSS.

Figura 9 - *Finding Chart* de CSS110225. Campo de Visão de 5', o norte é para a direita e o leste é abaixo. A estrela V é a CSS110225, C1 é a primeira estrela de comparação para fotometria diferencial e assim por diante. A duplicação deve-se ao analisador de calcita usado na aquisição das imagens com o polarímetro.



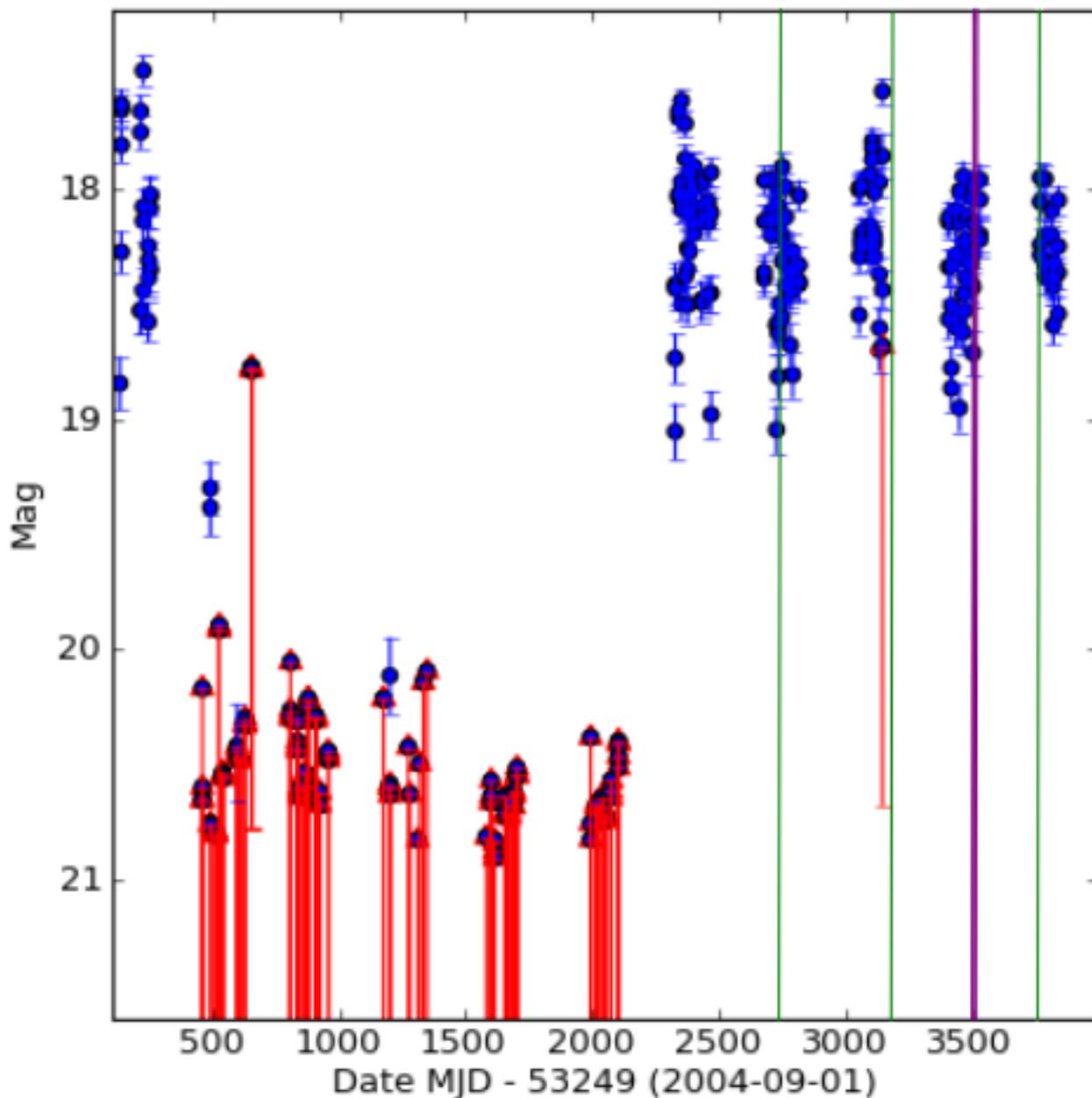
FONTE: O autor

Figura 10 - *Finding Chart* de CSS110225 obtido do *Digitized Sky Survey* (DSS) com um campo de visão de 10'. O norte é para a direita e o leste é abaixo.



FONTE: <http://aladin.u-strasbg.fr/aladin.gml> , acessado em 25/06/2015

Figura 11 - Curva de luz obtida pelo CRTS. O estado de baixo brilho está em vermelho e o de alto brilho em azul, as linhas azuis e vermelhas são as barras de erro associado a cada estado. As linhas verticais representam nossos dados e em verde dados espectrais em roxo dados polarimétricos.



FONTE: Adaptado de <http://crts.caltech.edu/> , acessado em 25/04/2015.

3 Observação e Redução de Dados

3.1 Observações

Os dados para este trabalho foram coletados entre os anos de 2012 e 2015 utilizando o telescópio SOAR de 4,1m, localizado no Cerro Pachón, Chile, e através do telescópio *Perkin-Elmer* de 1,6m do Observatório Pico dos Dias (OPD), localizado em Brasópolis-MG, dirigido pelo Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA). O telescópio SOAR foi utilizado para a coleta dos espectros. No OPD, utilizamos o telescópio para coletar os dados de polarimetria. A Tabela 2 apresenta informações sobre a aquisição dos dados. Os dados de espectroscopia de 2012 e 2013 foram obtidos pelo Dr. Alexandre Soares de Oliveira, a espectroscopia de 2015 foi obtida pela Dra. Karleyne Medeiros Gomes da Silva, os dados polarimétricos obtidos em 2014 foram obtidos na primeira e segunda noite pelos Drs. Karleyne Medeiros Gomes da Silva, Dionísio Cieslinski e pelo autor, na terceira noite foram obtidos pela Dra. Claudia Vilega Rodrigues e pela mestrandia Isabel Lima. O autor também foi colocado nas propostas de pedido de tempo para as observações de 2014 e 2015 como dependente de dados para esta dissertação.

Para a aquisição dos espectros utilizamos o *Goodman High Throughput Spectrograph* (Clemens, Crain e R. Anderson, 2004) e o CCD Fairchild 4096×4096 com $15 \mu\text{m pix}^{-1}$, configurado com ganho de $2,06 e^-/\text{ADU}$ e ruído de leitura de $3,99 e^- \text{ RMS}$. Um conjunto de 3 espectros exploratórios foram obtidos em 2012 em modo fila de observação. Nesta ocasião, configuramos o espectrógrafo com a rede VPH de 600 l mm^{-1} e a fenda de $1,68 \text{ arcsec}$, obtendo resolução espectral de 7 \AA FWHM no intervalo entre 4350 e 7005 \AA . Em 2013 e 2015 obtivemos duas séries temporais de espectros em modo remoto de observação, totalizando cerca de 7,5 horas de monitoria. O espectrógrafo foi configurado com a rede de 1200 l mm^{-1} e fenda de $0,84 \text{ arcsec}$, resultando numa resolução espectral de $1,6 \text{ \AA FWHM}$ e cobertura de 4320 a 5620 \AA . Em todas as ocasiões obtivemos espectros de calibração da lâmpada de CuAr a intervalos de 1 hora de observação de ciência, além de alinhar a fenda com o ângulo paralático com esta mesma periodicidade com o intuito de minimizar a perda de luz pela refração atmosférica diferencial. Espectros da estrela padrão espectrofotométrica LTT 3218 foram obtidos com as respectivas configurações instrumentais para calibração de fluxo. Exposições de *flatfields* e *bias* foram tomadas durante o dia. A linha espectral telúrica de $[\text{O I}] 5577 \text{ \AA}$ foi coberta em todos os espectros e usada para verificação da acurácia da calibração em comprimento de onda.

Para os dados de polarimetria e fotometria, obtidos através do telescópio *Perkin-Elmer* do OPD, utilizamos o CCD Ikon 13739 configurado com ganho de

1,0 e⁻/ADU e ruído de leitura de 6,0 e⁻ rms, acoplado à gaveta polarimétrica (Magalhães, Rodrigues et al., 1996), instalada no foco do Cassegrain. A gaveta polarimétrica é composta por uma lâmina retardadora de quarto de onda ($\lambda/4$) usada para obter tanto a polarização linear quanto a circular, cuja posição inicial corresponde ao ângulo de zero graus e a cada mudança soma-se 22,5°, de modo que a lâmina apresenta 16 posições diferentes. Um analisador de prisma Savant (de calcita) divide o feixe do objeto em dois feixes de polarizações ortogonais. Assim, temos duas imagens para cada objeto, obtidas com os filtros V e I para a missão. Os dados foram coletados em abril de 2014, quando obtivemos um total de 346 imagens. Para um ajuste correto da direção da polarização do objeto, foram observadas as estrelas padrões polarizadas HD110984, HD111579, HD126593, HD298383 e Ve6-23. A fim de verificar se há uma polarização instrumental utilizamos estrelas padrões que não possuem polarização, são elas HD154892, HD98161, HD94851 e WD1620-39.

Tabela 2 - Dados das observações.

Data	Observatório	Tipo de observação	Tempo de exposição (s)	Número de exposições	Filtro
18/03/2012	SOAR	Espectroscopia	480	3	-
29/05/2013	SOAR	Espectroscopia	600	15	-
21/01/2015	SOAR	Espectroscopia	600	23	-
25/04/2014	OPD	Polarimetria	90	80	V
26/04/2014	OPD	Polarimetria	90	146	I
27/04/2014	OPD	Polarimetria	85/150 ^a	121 ^a	V

^aObjeto com baixa contagem devido ao mau tempo, aumentamos o tempo de exposição obtendo 32 imagens com 85 segundos e 89 imagens com 150 segundos.

3.2 Redução de dados

Os dados passaram por rotinas padrões de redução. Elas têm o objetivo de eliminar assinaturas causadas por determinadas características físicas e operacionais presentes nos CCDs e no conjunto óptico dos telescópios. Estas assinaturas interferem na contagem de fótons, então são indispensáveis para a análise dos dados. Para corrigi-las foram feitas as reduções de *bias frame* e *flat field* com as rotinas padrões do IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*)¹.

A correção do *bias frame* é necessária para corrigir a contagem de carga pré alocada nos *pixels* que os CCDs configuram a fim de evitar contagens negativas. Estas contagens são chamadas de *bias level* e tem um efeito aditivo à imagem. Para retirar

¹IRAF é distribuído pelo National Optical Astronomy Observatories, operado pela Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., sob acordo de cooperação com a National Science Foundation.

este efeito são feitas exposições com o menor tempo possível e com o obturador do CCD fechado, obtendo, desse modo, um valor aproximado para o *bias level* pixel a pixel. São feitas exposições suficientes para obter uma boa estatística na imagem média. A imagem média é, por fim, subtraída das imagens de ciência e de *flat field*.

O *flat field* é uma correção utilizada para calibrar a sensibilidade de cada *pixel* do CCD, pois os *pixels* do CCDs possuem um ganho diferente entre si, o que gera respostas diferentes para uma mesma intensidade de radiação. Este efeito é multiplicativo no valor das contagens. A imagem de calibração de *flat field* é obtida através de imagens com um alto número de contagens (cerca de metade ou um pouco maior que o intervalo dinâmico), para que haja uma relação sinal-ruído alta, e exposições rápidas para evitar a saturação do CCD. Estas imagens devem possuir uma iluminação uniforme em cada *pixel*. Há diferentes maneiras para obter as imagens de *flatfield*. Os procedimentos mais comuns são exposições do interior da cúpula do telescópio ou de uma tela montada em seu interior (*flat* de cúpula), ambos iluminados por uma lâmpada; ou então por exposições do céu durante o crepúsculo (*skyflat*) ou ainda uma iluminação por lâmpada interna ao instrumento. Como a sensibilidade dos *pixels* também depende da faixa espectral é necessário que as imagens de *flat field* sejam feitas com os mesmos filtros utilizados nas observações de ciência. São feitas, novamente, exposições suficientes para obter uma boa estatística, após isso, combina-se as imagens para obter uma imagem média do valor encontrado para o *flatfield*. As imagens de ciência são, ao final, divididas pelo *flat field* médio.

Neste trabalho optou-se por usar o *flat field* obtido através de uma tela iluminada no interior da cúpula do telescópio para os dados de polarimetria e *flat fields* internos de lâmpada de quartzo para espectroscopia.

3.3 Espectroscopia

Os espectros de ciência passaram pelas rotinas padrões de calibração e posteriormente por um processo de extração. Este processo de extração é necessário pois os espectrógrafos produzem imagens bidimensionais, ou seja, imagens que possuem um eixo espacial e um eixo de dispersão, que devem ser transformadas em espectros unidimensionais. Em cada espectro bidimensional é feito um corte ao longo do eixo espacial para que se determine o centro do perfil do objeto e uma janela de extração de tamanho adequado e de mesmo centro. Como o eixo do espectro geralmente não é paralelo ao eixo de dispersão, utiliza-se o ajuste de uma função de Legendre ou *spline* cúbica ao eixo do espectro para otimizar a soma das contagens, sendo este ajuste realizado em cada espectro bidimensional. Em cada ponto ao longo do eixo traçado pela função são somadas as contagens da janela de extração e subtraídas as contagens

de céu de janelas contíguas, para a eliminação das linhas telúricas. Desta maneira são extraídos espectros unidimensionais a partir das contagens dos *pixels* espectrais.

Após a extração deve-se calibrar o eixo de dispersão do espectro em função do comprimento de onda. Para isto utilizam-se espectros da luz de uma lâmpada padrão cujas linhas de emissão possuem comprimentos de onda bem determinados. Os espectros da lâmpada devem ser temporalmente próximos dos do objeto, para que possa corrigir alterações produzidas por flexões no espectrógrafo devido ao movimento do telescópio. A partir das linhas de emissão da lâmpada é feito o ajuste de uma função que relaciona os comprimentos de onda aos *pixels* espectrais. Esta função é então utilizada para calibrar os espectros do objeto. O processo de extração dos espectros foi realizado com a tarefa APALL do IRAF. Para a calibração em comprimento de onda dos espectros de 2013 foram utilizadas duas exposições de lâmpada contíguas a cada exposição de ciência, as quais receberam pesos de acordo com sua proximidade temporal com o respectivo espectro. Para os espectros de 2015 utilizamos espectros de lâmpada imediatamente posteriores a aquisição de séries de cinco espectros. Para minimizar o erro da calibração em comprimento de onda avaliamos a posição da linha telúrica de [OI] 5577,338 Å em cada espectro de ciência calibrado e aplicamos assim uma correção linear de ponto zero. O RMS do comprimento de onda desta linha telúrica ficou em 0,2 km/s após esta calibração de segunda ordem.

Os espectros de ciência foram calibrados em fluxo, quando disponível, a partir dos espectros obtidos da estrela padrão espectrofotométrica LTT 3218 (Hamuy, Walker et al., 1992; Hamuy, Suntzeff et al., 1994), utilizando as rotinas STANDARD, SENSFUNC e CALIBRATE, do pacote NOAO.ONEDSPEC do IRAF.

3.4 Polarimetria

A redução dos dados polarimétricos foi feita utilizando o pacote de redução de imagens polarimétricas PCCDPACK (Pereyra, 2000), além de outros processos de redução desenvolvidos pela Dra. Cláudia Vilega Rodrigues e colaboradores, todos em ambiente IRAF. Como o analisador divide o feixe de luz em dois, o feixe ordinário e o extraordinário, identificamos os pares correspondentes para cada objeto em cada exposição. Em seguida efetuamos a correção de um possível deslocamento entre as imagens. Esse deslocamento pode ser provocado, por exemplo, por imprecisão no acompanhamento sideral do telescópio. Para medir o fluxo ordinário e extraordinário de cada imagem do objeto fizemos a fotometria diferencial de abertura, que é essencial para a realização da polarimetria. Nesse procedimento usamos a subrotina PHOT do pacote APPHOT do IRAF, onde escolhemos dez aberturas para o cálculo. Ao final da redução escolhemos a abertura de menor erro.

Por fim, calculamos a polarização com a subrotina PCCDGEN do pacote PC-CDPACK, onde fornecemos como entrada os resultados obtidos para a fotometria de abertura. Para cada série de 8 imagens obtidas com a lâmina de quarto de onda, obtivemos uma medida das polarizações linear e circular do objeto.

O ângulo de polarização foi ajustado para o sistema equatorial em nossas medidas. Este ajuste é feito calculando o ângulo médio de cada uma das padrões polarizadas observadas na missão. As padrões não polarizadas não apresentaram uma polarização linear significativa, portanto, para este trabalho, não utilizamos o ajuste da polarização instrumental. O ajuste do ângulo e a correção da polarização instrumental são exemplificados na seção 3.4.2 levando em consideração para o ajuste do ângulo a Tabela 4 e os valores encontrados que justificam a não correção da polarização instrumental estão na Tabela 3.

3.4.1 Cálculo da Polarização

A determinação da polarização é descrita a partir dos parâmetros de Stokes para a radiação eletromagnética como:

$$S = \begin{Bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V_c \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

onde I é a intensidade do fluxo, Q e U são medidas da polarização linear e V_c é a medida da polarização circular. Para objetos com polarização nula temos a relação $Q = U = V_c = 0$, os objetos que possuem polarização exclusivamente linear apresentam $V_c = 0$ enquanto objetos com polarização exclusivamente circular têm $Q = U = 0$. Um feixe completamente polarizado possui:

$$I = \sqrt{Q^2 + U^2 + V_c^2}. \quad (4)$$

A polarização linear é dada por:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}. \quad (5)$$

A polarização circular é:

$$V = \frac{V_c^2}{I}. \quad (6)$$

Através do resultado da fotometria diferencial de abertura calculamos a polarização com um código FORTRAN (Magalhães, Rodrigues et al., 1996 e Magalhães, Benedetti e Roland, 1984). Este código é usado para cálculo de polarização quando se utiliza a lâmina retardadora de meia onda. Para o cálculo com a lâmina de quarto de onda a solução é apresentada por Rodrigues, Cieslinski e Steiner (1998). Os fluxos dos feixes ordinário e extraordinário dependentes dos parâmetros de Stokes podem ser determinados como:

$$\begin{aligned} 2I_o &= I + q \cos^2 2\theta + u \sin 2\theta \cos 2\theta - v \sin 2\theta, \\ 2I_e &= I - q \cos^2 2\theta - u \sin 2\theta \cos 2\theta + v \sin 2\theta, \end{aligned} \quad (7)$$

onde I_o e I_e são o fluxo das imagens ordinária e extraordinária respectivamente, θ é o ângulo da posição da lâmina retardadora e I , q , u , e v são os parâmetros de Stokes do feixe incidente.

Os parâmetros de Stokes são, então, definidos a partir das relações (Rodrigues, Cieslinski e Steiner, 1998):

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{3} \sum z_i \cos^2 2\theta_i, \\ U &= \sum z_i \sin 2\theta_i \cos 2\theta_i, \\ V &= -\frac{1}{4} \sum z_i \sin 2\theta_i, \end{aligned} \quad (8)$$

onde θ_i é o ângulo da lâmina retardadora na posição i ($i = 1$ a 16), Q , U e V são os parâmetros de Stokes normalizados por I ($Q = q/I$, $U = u/I$ e $V = v/I$) do feixe de entrada. A quantidade z_i é dada por:

$$z_i = \frac{I_{e,i} - I_{o,i}}{I_{e,i} + I_{o,i}}. \quad (9)$$

Tabela 3 - Estrelas padrões não polarizadas.

Objeto	Data	Filtro	P(%)	σ_P (%)	θ
HD154892	25 abr 14	V	0,138	0,0544	170,6
HD98161	25 abr 14	V	0,989	0,227	77,0
HD94851	26 abr 14	I	0,061	0,041	76,9
WD1620	27 abr 14	V	0,242	0,079	161,3

Tabela 4 - Estrelas padrões polarizadas.

Objeto	Data	Filtro	P(%)	σ_P (%)	θ	$\Delta\theta$
HD126593	25 abr 14	V	3,795	0,353	60,6	80,7
HD111579	25 abr 14	V	6,701	0,110	93,1	80,7
	27 abr 14	V	6,859	0,128	78,5	80,7
HD110984	27 abr 14	V	6,034	0,132	66,3	80,7
HD298383	26 abr 14	I	3,772	0,155	125,9	79,85
Ve6-23	26 abr 14	I	6,353	0,218	151,8	79,85

3.4.2 Ajuste do ângulo de polarização

A correção para a polarização instrumental é feita subtraindo o valor médio encontrado para as estrelas padrões não polarizadas para cada filtro utilizado. A tabela 3 apresenta os valores obtidos para as estrelas padrões não polarizadas durante a missão, porém os valores encontrados para os nossos dados para a polarização instrumental são baixos (significância de 0,2%), com isso decidimos não utilizar este tipo de correção para este trabalho.

Para o ajuste do ângulo de polarização com um referencial padrão observamos estrelas padrões polarizadas (Tabela 4), e através do ângulo de posição medido (θ), comparamos com os valores encontrados na literatura (Turnshek et al., 1990 e Fos-sati et al., 2007) encontrando $\Delta\theta$ mostrado na Tabela 4. Este ângulo ($\Delta\theta$) foi usado para corrigir o ângulo observado com o ângulo equatorial das imagens de ciência.

3.5 Fotometria

A fotometria diferencial de abertura para este trabalho foi feita junto com o processo de polarimetria. Usamos as estrelas de comparação definidas na Figura 9. As imagens da polarimetria são duplicadas devido ao analisador de calcita. Para o cálculo da fotometria precisamos somar ambas contribuições do feixe. Para isto, utilizamos as rotinas TIME_POL e PLOTA_LUZ criadas por Cláudia Vilega Rodrigues com base nos pacotes do PCCDPACK. Para testar a veracidade dos resultados obtidos, utilizamos as

rotinas padrões do IRAF (DIGIPHOT, APPHOT). Os dados de polarimetria/fotometria foram obtidos em noites com cirrus e nuvens próximas, degradando a qualidade dos dados.

4 Resultados

4.1 Espectroscopia

4.1.1 Espectros médios

O espectro exploratório médio de CSS110225, obtido em 2012, é apresentado na Figura 12. O espectro é dominado por linhas de emissão de H e HeI, além de apresentar as linhas de HeII 4686 Å e Fe II 5169 Å. Nenhuma componente estelar de absorção é visível, apenas a linha telúrica 6872 Å. O contínuo é plano, com uma subida para o azul extremamente leve. O decremento de Balmer invertido ($H\beta$ mais intensa que $H\alpha$) que se observa neste espectro exploratório é característico de polares, porém a linha de HeII 4686 Å não têm a mesma grande intensidade típica de regiões emissoras opticamente espessas e de alta ionização comuns nas polares. As linhas de emissão de HeI e HeII são bem ajustadas por perfis Gaussianos, porém as linhas de Balmer ($H\alpha$, $H\beta$) tem um melhor ajuste por perfis de Lorentz, por apresentarem perfis com asas bastante estendidas. A medida da largura equivalente e FWHM das linhas espectrais dos anos de 2012, 2013 e 2015 são apresentadas na Tabela 5. Os valores médios de FWHM das linhas de Balmer ($\text{FWHM} \sim 500 - 600 \text{ km s}^{-1}$) são relativamente pequenos em relação aos valores geralmente observados em VCs comuns por não apresentarem o disco de acrecimento.

O espectro médio constituído da série temporal de 15 espectros obtidos em 2013 é mostrado na Figura 13. Nesta ocasião não observamos estrelas padrões espectrofotométricas, portanto o espectro médio está apenas normalizado pelo contínuo e não calibrado em fluxo. Em comparação com o espectro médio obtido pouco mais de um ano antes, este espectro não apresenta mudanças significativas em perfis e razões de linhas, e novamente as linhas de Balmer apresentam perfis Lorentzianos enquanto as demais linhas têm perfis Gaussianos. Ao longo da duração desta série temporal de 15 espectros as linhas também não mostraram variabilidades significativas de perfis (Figura 15). O espectro médio dos 23 espectros da série temporal de 2015 (Figura 14) não apresenta alterações significativas em relação aos espectros de 2012 e 2013, em termos de intensidades e de variabilidade dos perfis das linhas (Figura 16).

4.1.2 Velocidades radiais e análise de periodicidades

Medimos as velocidades radiais das linhas mais proeminentes dos 15 espectros de 2013, ajustando uma função Gaussiana aos picos dos perfis das linhas, e usamos estas medidas para buscar periodicidades. As curvas de velocidades radiais das linhas de $H\beta$ e $H\gamma$ são mostradas na Figura 17, enquanto que as curvas das linhas

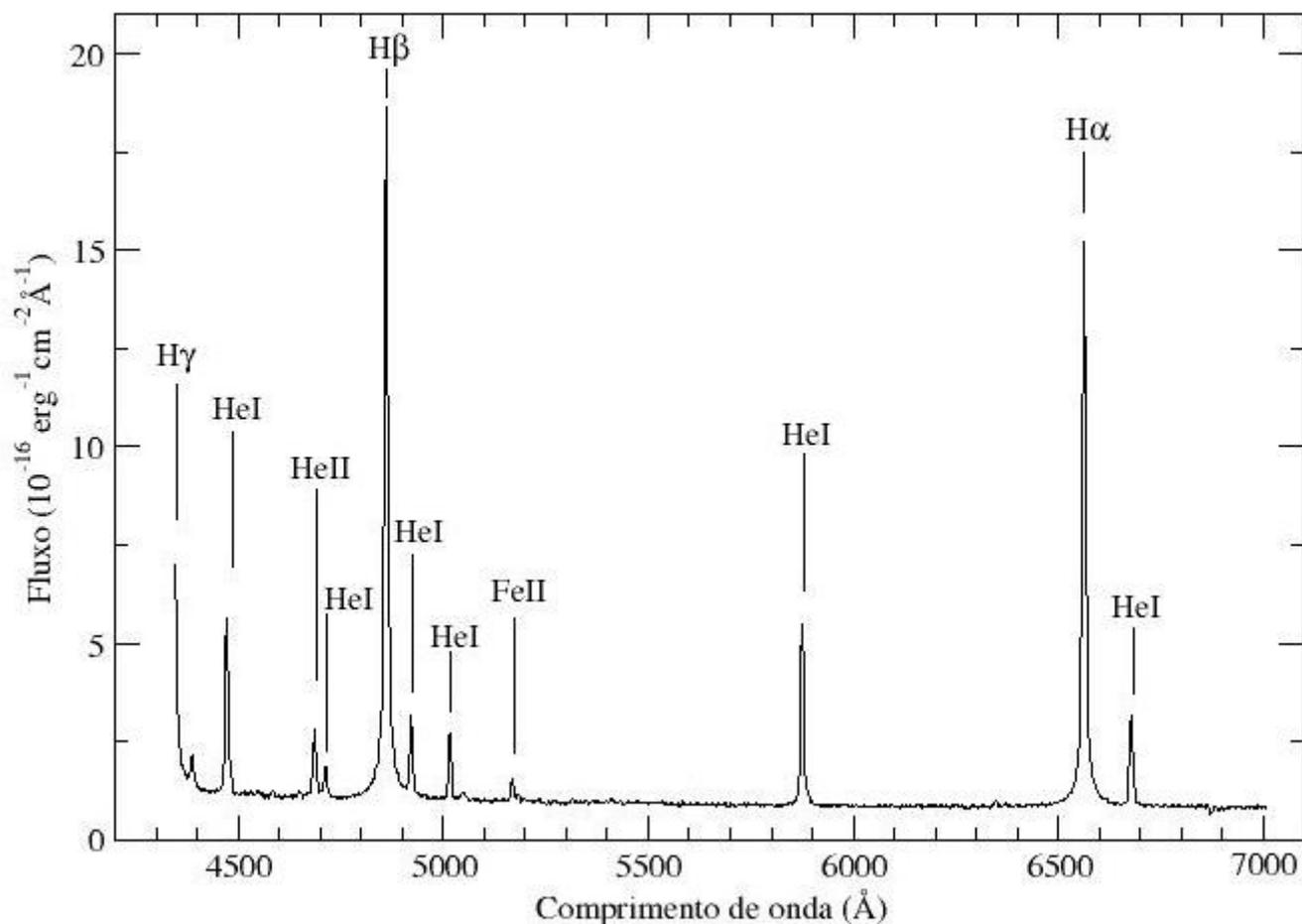
Tabela 5 - Identificação, largura equivalente (EW) e largura à meia-altura (FWHM) de linhas de emissão no espectro médio de CSS110225 nos anos de 2012, 2013 e 2015.

Data	Identif.	-EW (Å)	FWHM (km s ⁻¹)
18 de março de 2012	HeI 4388 Å	6	650
	HeI 4471 Å	35	520 ^a
	HeII 4686 Å	12	610
	HeI 4713 Å	6	520
	H β	201	530 ^a
	HeI 4922 Å	14	500
	HeI 5016 Å	13	490
	FeII 5169 Å	6	550
	HeI 5875 Å	54	380
	H α	239	430 ^a
29 de maio de 2013	HeI 6678 Å	29	450
	H γ	97	550 ^a
	HeI 4388 Å	6	750
	HeI 4471 Å	32	680
	HeII 4686 Å	14	640
	HeI 4713 Å	6	590
	H β	170	560 ^a
	HeI 4922 Å	14	600
21 de janeiro de 2015	HeI 5016 Å	15	570
	FeII 5169 Å	5	500
	H γ	126	570 ^a
	HeI 4388 Å	6	770
	HeI 4471 Å	40	640
	HeII 4686 Å	17	630
	HeI 4713 Å	9	750
	H β	178	550 ^a
HeI 4922 Å	13	580	
HeI 5016 Å	16	540	
Fe II 5169 Å	4	540	

^a Linha ajustada por perfil de Lorentz. As demais foram ajustadas por perfis gaussianos.

de HeII 4686 Å e HeI 4471 Å são apresentadas na Figura 18. Tanto H β quanto H γ têm variações aproximadamente senoidais com amplitudes totais próximas a 50 km/s, apresentando modulação com dois ciclos completos neste intervalo de cerca de três horas de observação. Nos mesmos gráficos apresentamos a curva de velocidade radial da linha telúrica de [OI] 5577,338 Å que também está presente nos dados. Esta curva é plana ($\sigma_{vr} = 1,2$ km/s) assegurando a qualidade da calibração em comprimento de onda e mostrando que a variação das linhas de emissão é real. As curvas

Figura 12 - Espectro exploratório médio, obtido em 2012. Nota-se o decréscimo de Balmer invertido e a presença de HeII 4686 Å em baixa intensidade.

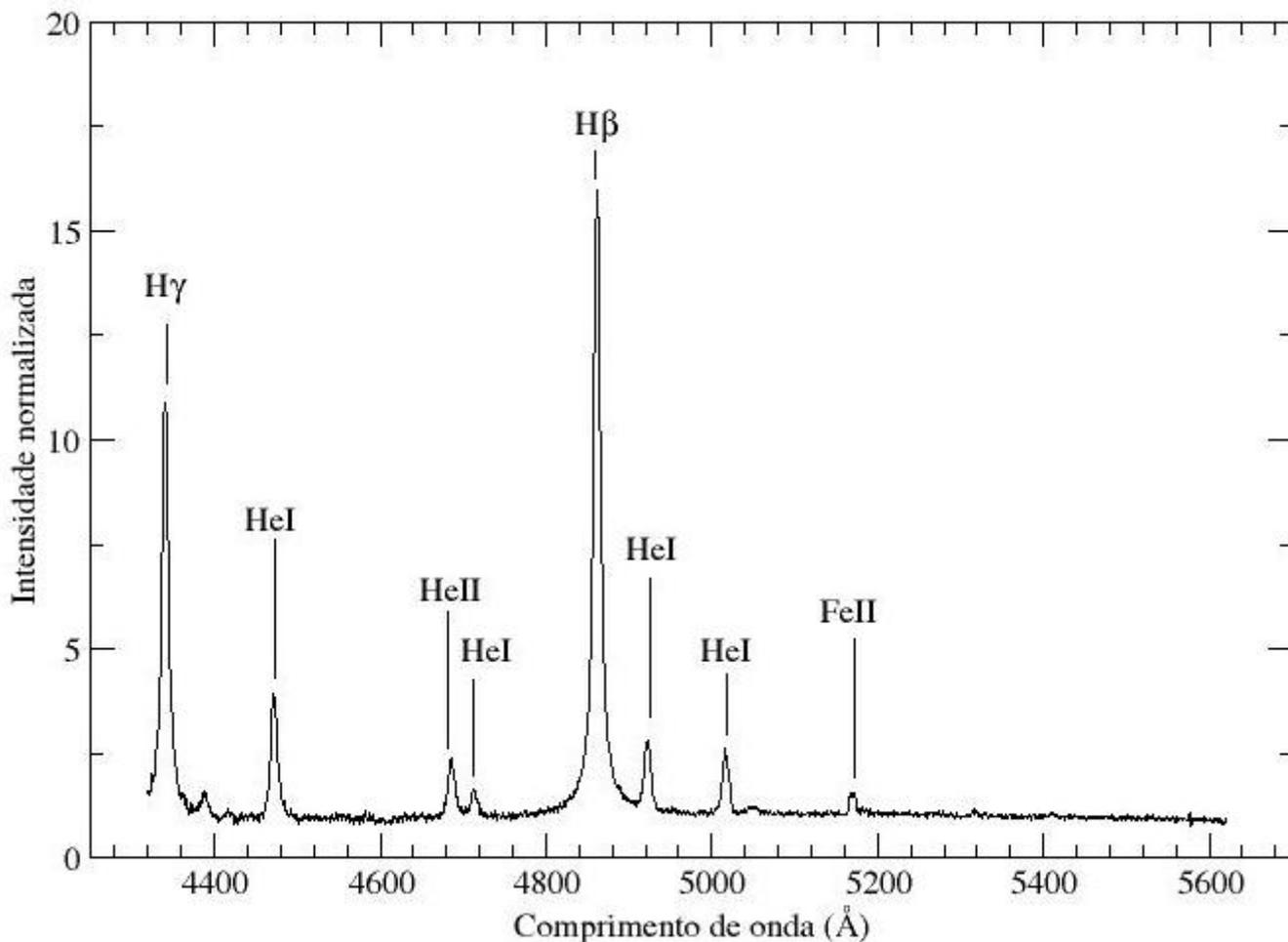


de velocidade radial de HeII e HeI da série temporal obtida em 2013 (Figura 18), apresentam um comportamento semelhante, porém a modulação é muito mais irregular.

As curvas de velocidades radiais obtidas dos espectros de 2015 estão apresentadas nas Figuras 19 e 20. A modulação senoidal presente nas linhas de H β e H γ dos dados de 2013 é visível, porém mais ruidosa, nos dados de 2015 (Fig. 19), com uma amplitude total próxima de 20 km/s. Estão presentes três ciclos completos no intervalo de quatro horas de observação. É notável a mudança no valor da velocidade sistêmica γ deste ano de 2015 em relação a 2013. A linha telúrica de [OI] 5577,338 Å é plana com variação de $\sigma_{vr} = 0,2 \text{ km/s}$ assegurando a calibração em comprimento de onda. As linhas de HeI e HeII (Fig. 20) não apresentam modulação clara.

Para a análise de periodicidades nas curvas de velocidades radiais utilizamos o *Phase Dispersion Minimization* (PDM, Stellingwerf, 1978). O periodograma obtido para os dados de velocidade radial da linha de H β de 2013 é mostrado na Figura

Figura 13 - Espectro médio da série temporal de 15 espectros obtidos em 2013. A intensidade foi normalizada pelo contínuo pois na época não foram observadas estrelas padrões espectrofotométricas.



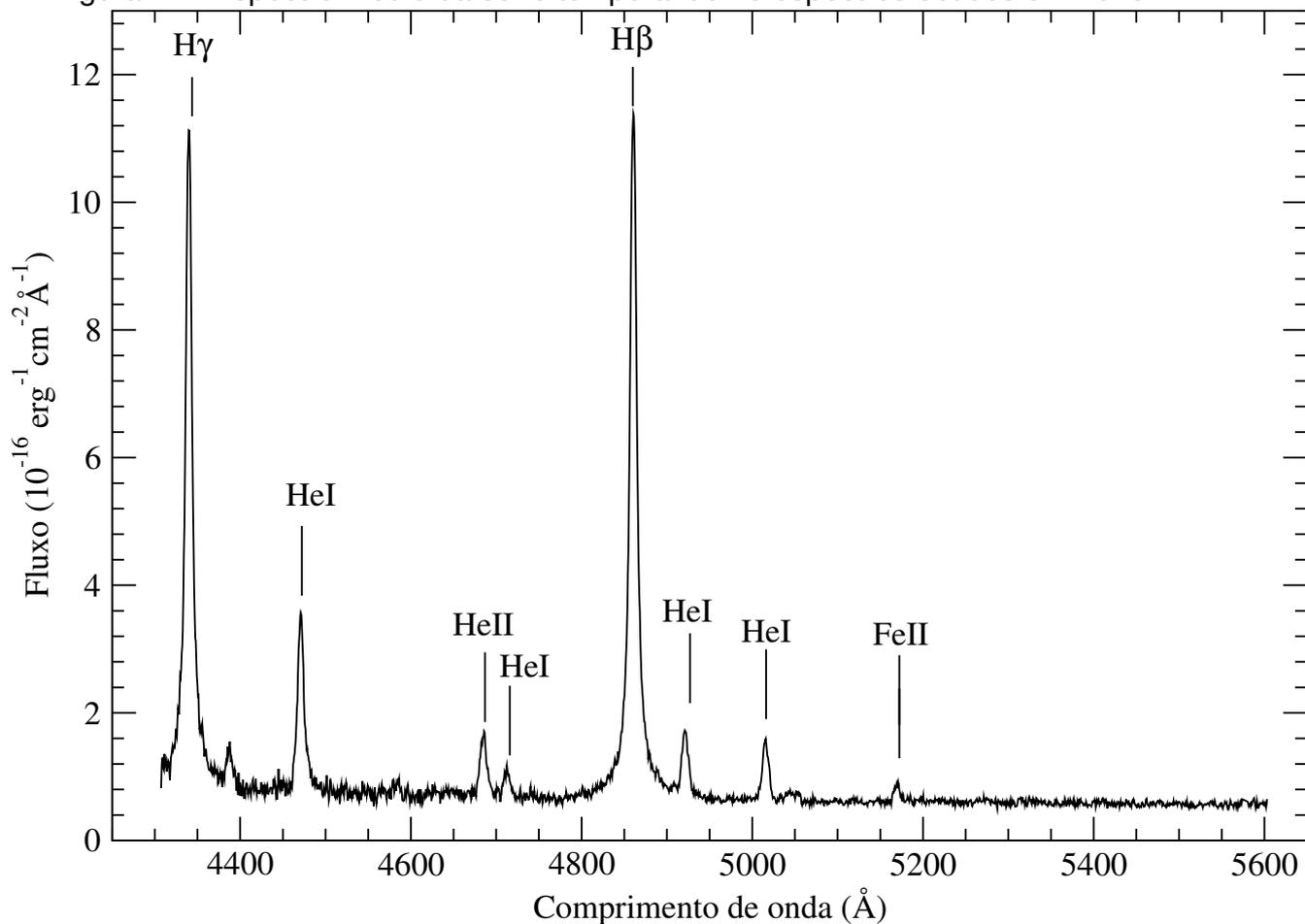
21. No intervalo de períodos analisado (0,01 a 0,25 dias) o periodograma indica um período de 0,056 dias (~ 81 min). O periodograma das velocidades radiais de $H\beta$ de 2015 (Fig. 22) tem um comportamento semelhante ao de 2013, com um período de 0,055 dias (~ 79 min), compatível com o anterior.

Tabela 6 - Parâmetros orbitais do ajuste senoidal às velocidades radiais da linha de $H\beta$.

Data	T_0	P(dias)	K_1 (km/s)	γ (km/s)
29-05-2013	$2456442,645 \pm 0,003$	$0,056 \pm 0,025$	25 ± 8	22
21-01-2015	$2457044,852 \pm 0,005$	$0,055 \pm 0,012$	10 ± 7	-35

As efemérides espectroscópicas associadas à linha de $H\beta$ para os dados de

Figura 14 - Espectro médio da série temporal de 23 espectros obtidos em 2015



2013 e 2015 são mostrada na Tabela 6. A fase zero (T_0) é definida como a transição de velocidades radiais positivas para negativas, quando comparadas à velocidade sistêmica γ , P é o período obtido do periodograma e K_1 é a semi-amplitude do ajuste senoidal. As Figuras 23 e 24 apresentam as curvas de velocidade radial de $H\beta$ de 2013 e 2015 em fase com o período e época correspondente da efeméride.

Figura 15 - Espectros da linha de $H\beta$ da série temporal de 2013. A linha vertical corresponde ao comprimento de onda de repouso desta linha. No eixo das ordenadas temos a distribuição dos espectros em fase orbital em relação à efeméride espectroscópica de 2013.

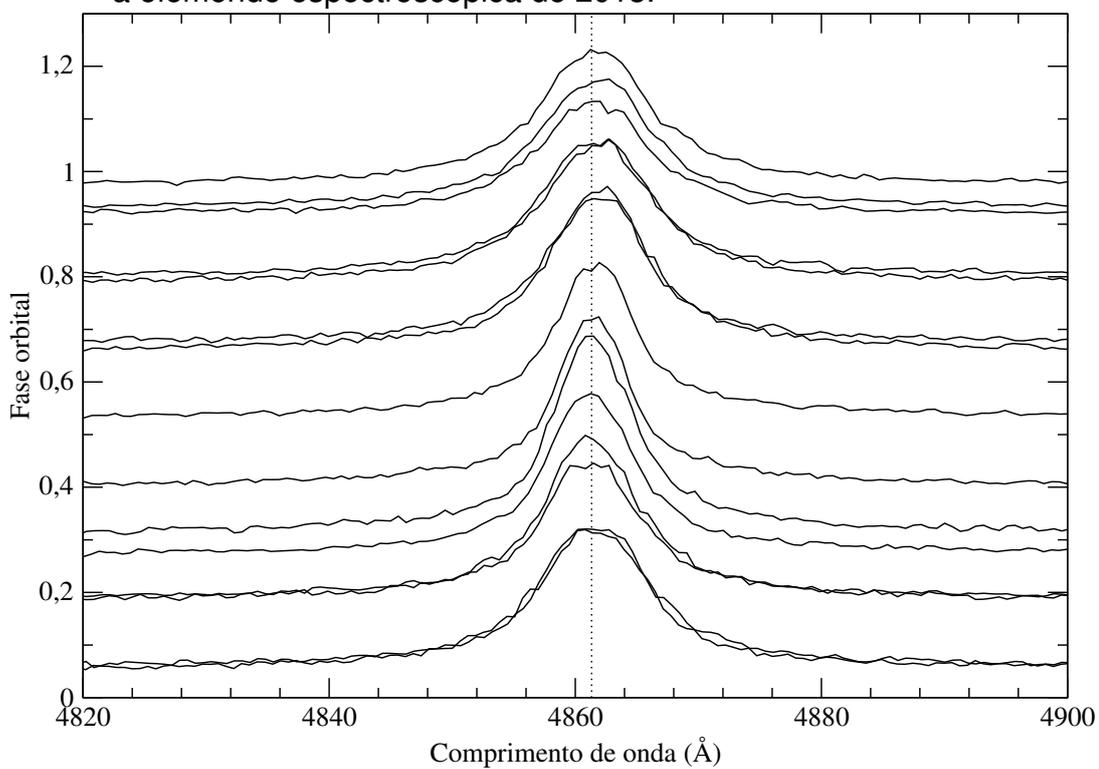


Figura 16 - Espectros da linha de $H\beta$ da série temporal de 2015. A linha vertical corresponde ao comprimento de onda de repouso desta linha. No eixo das ordenadas os espectros estão linearmente distribuídos na ordem cronológica de obtenção dos dados (de baixo para cima) para permitir uma melhor visualização.

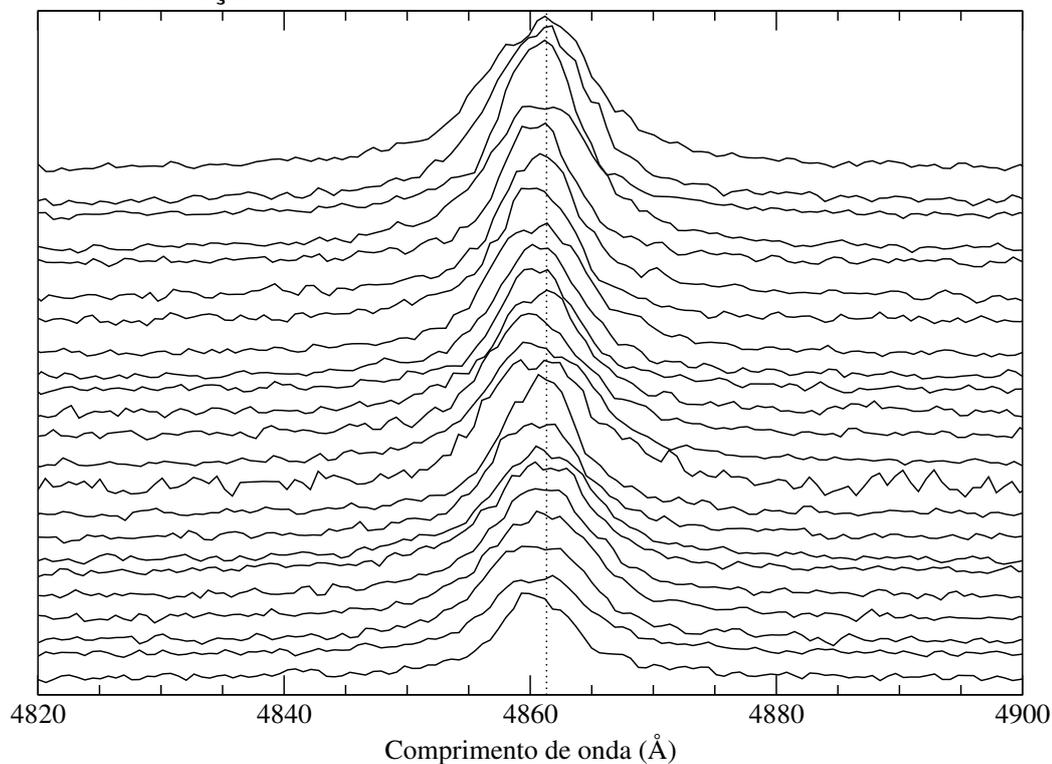


Figura 17 - Velocidade radial das linhas de $H\beta$, $H\gamma$ e da linha telúrica de $[O I]$ dos dados de 2013.

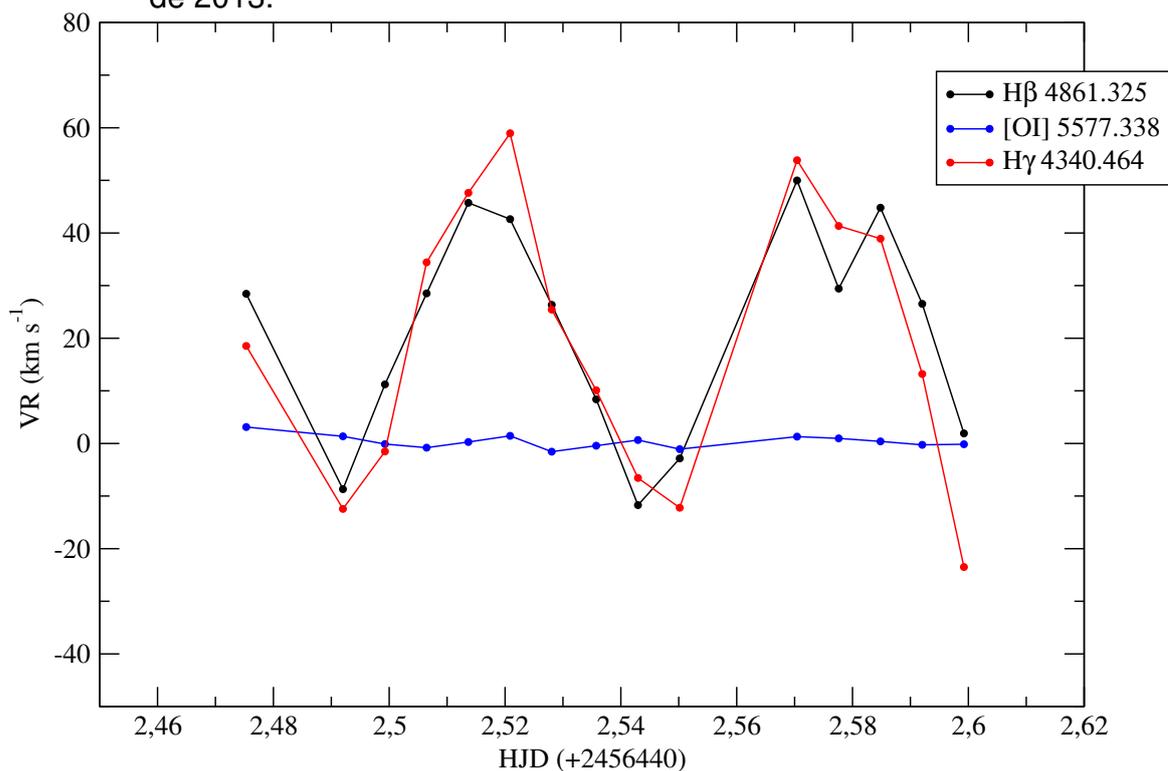


Figura 18 - Velocidade radial das linhas de HeII, HeI e da linha telúrica de[OI] dos dados de 2013.

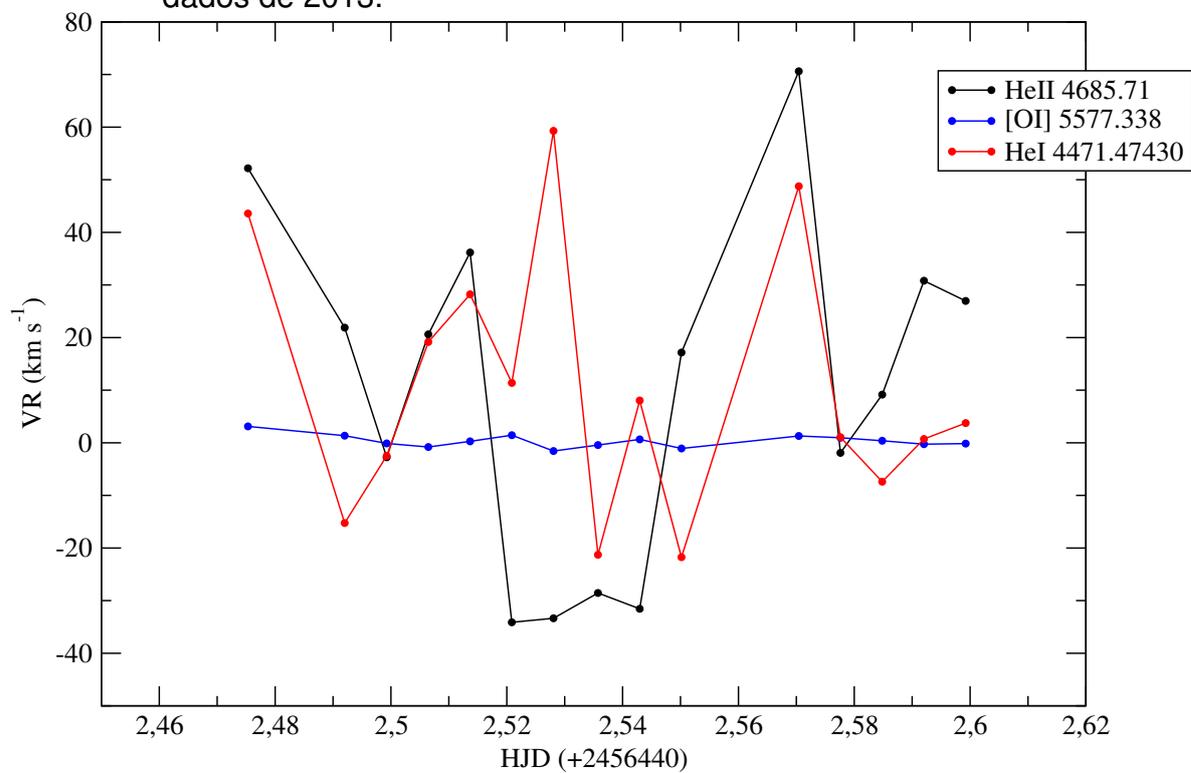


Figura 19 - Velocidade radial das linhas de $H\beta$, $H\gamma$ e a linha telúrica [OI] dos dados de 2015.

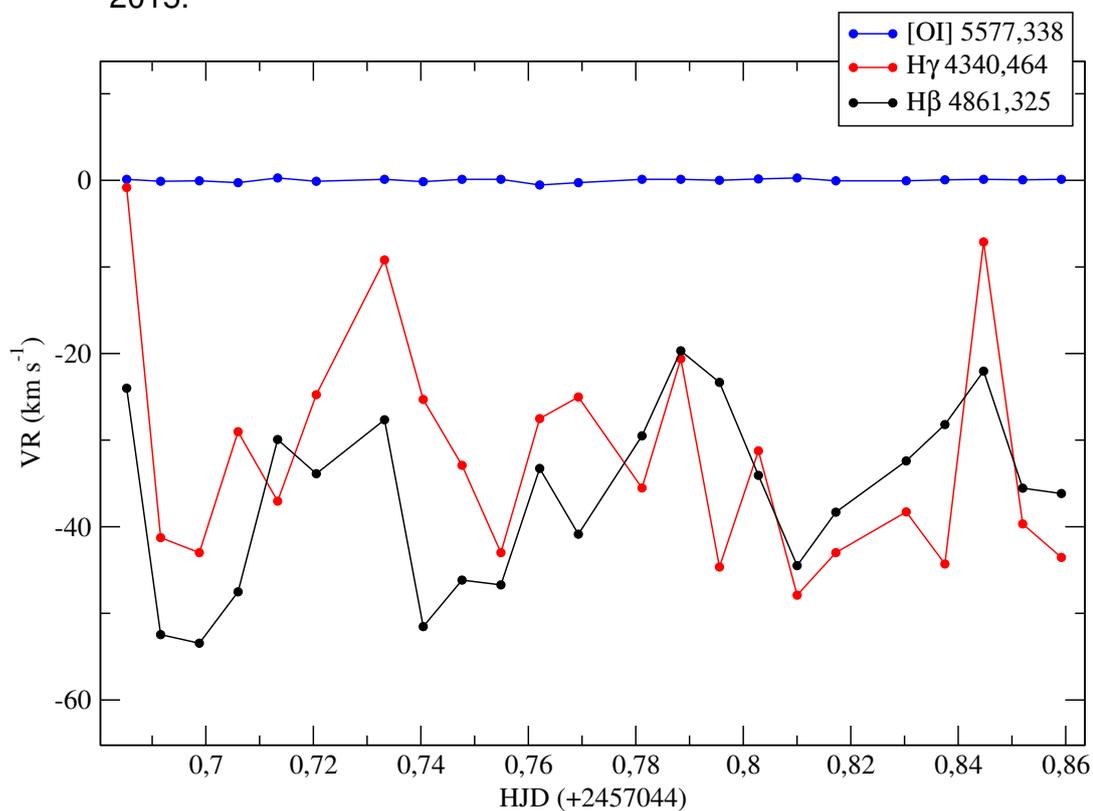


Figura 20 - Velocidade radial das linhas de HeII, HeI e a linha telúrica [OI] dos dados de 2015.

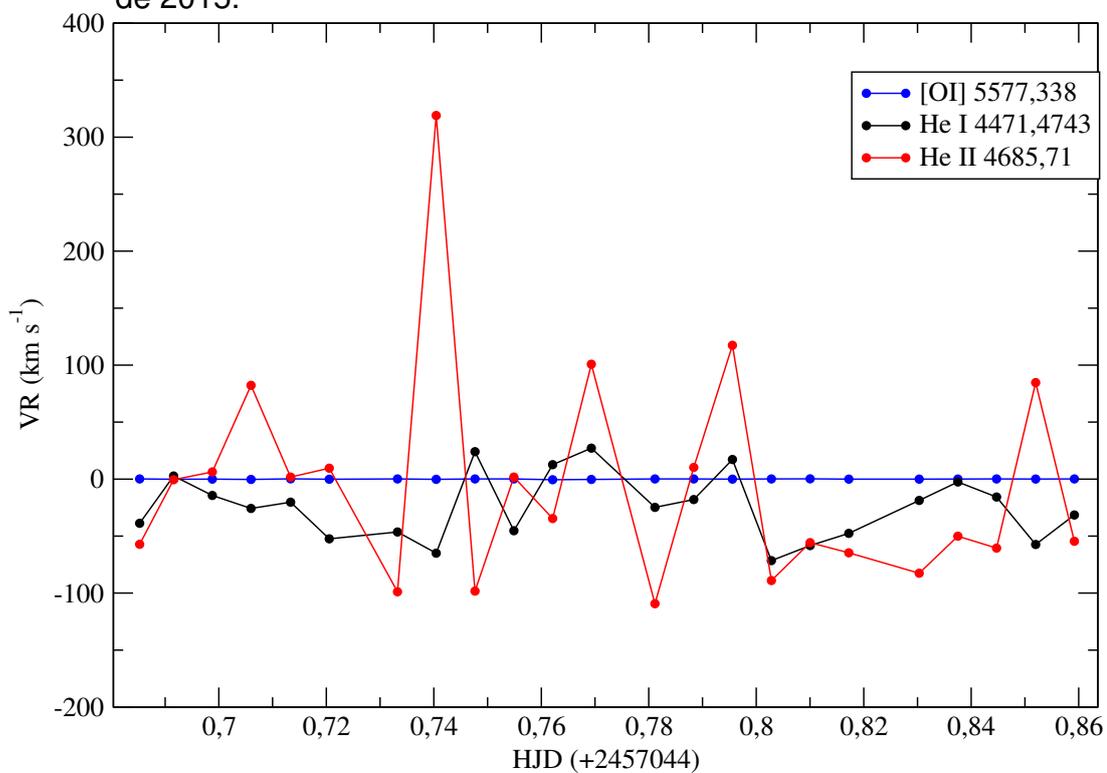


Figura 21 - Periodograma obtido para os dados de velocidade radial da linha de $H\beta$ de 2013.

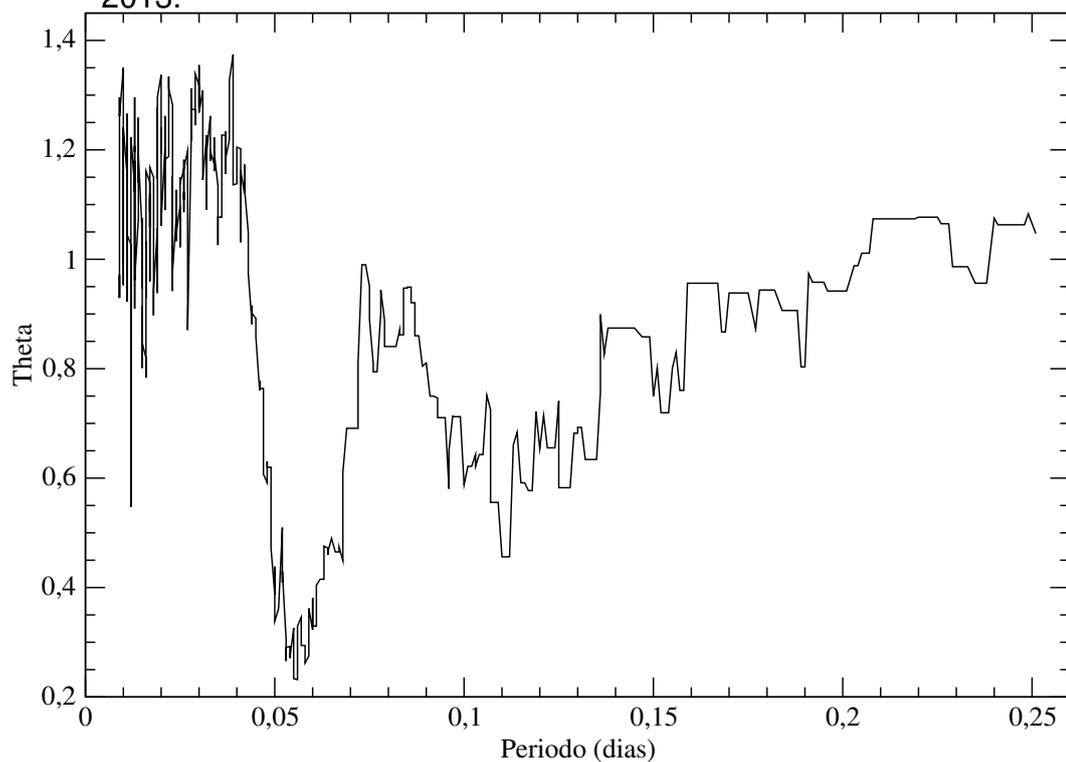


Figura 22 - Periodograma obtido para os dados de velocidade radial da linha de $H\beta$ de 2015.

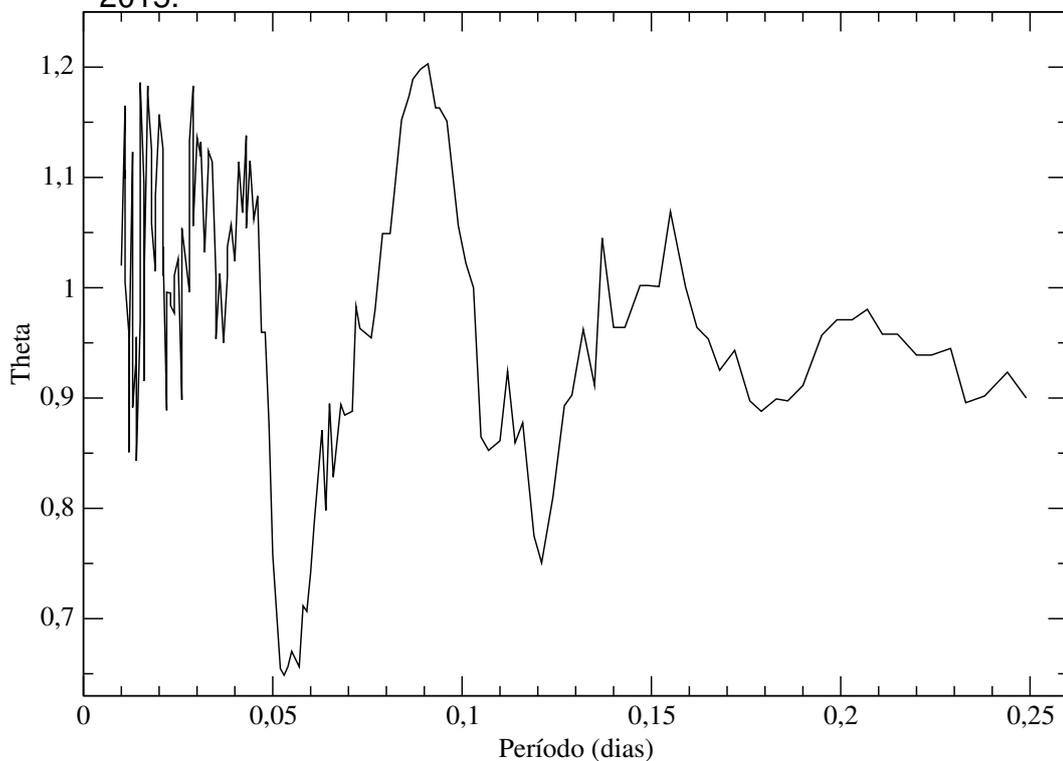


Figura 23 - Curva de velocidade radial de $H\beta$ em função da fase orbital dos dados 2013. A curva apresenta o melhor ajuste senoidal aos pontos e a reta horizontal representa a velocidade sistêmica $\gamma = 22$ km/s.

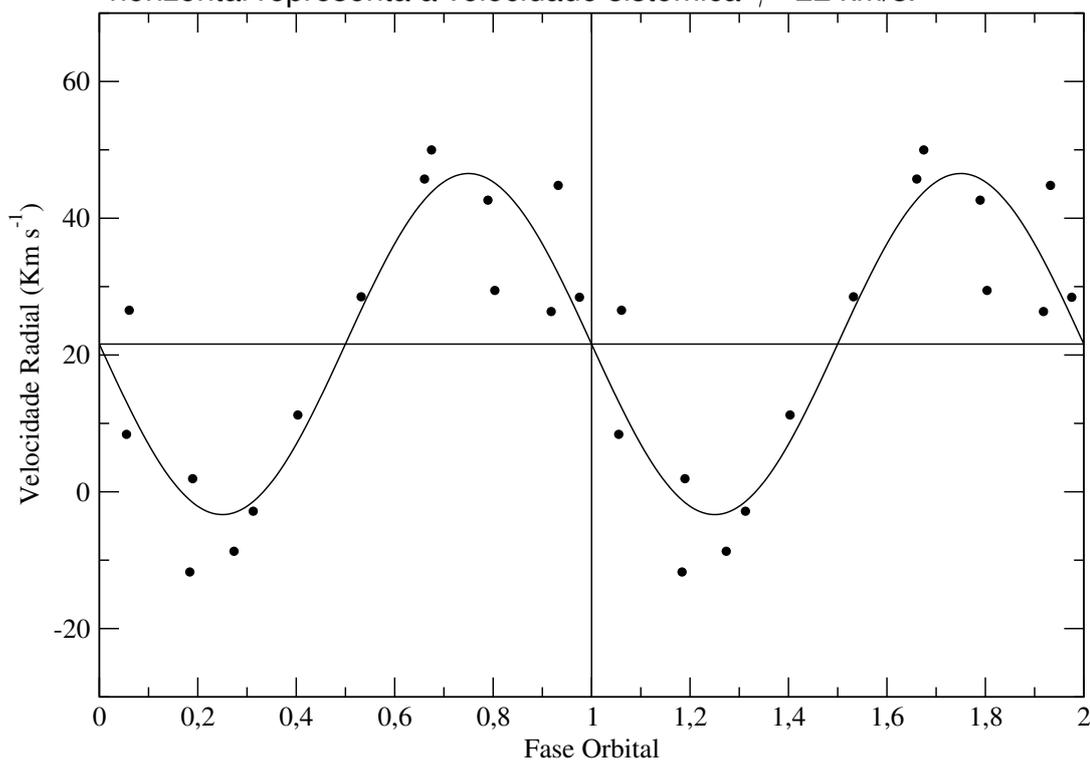
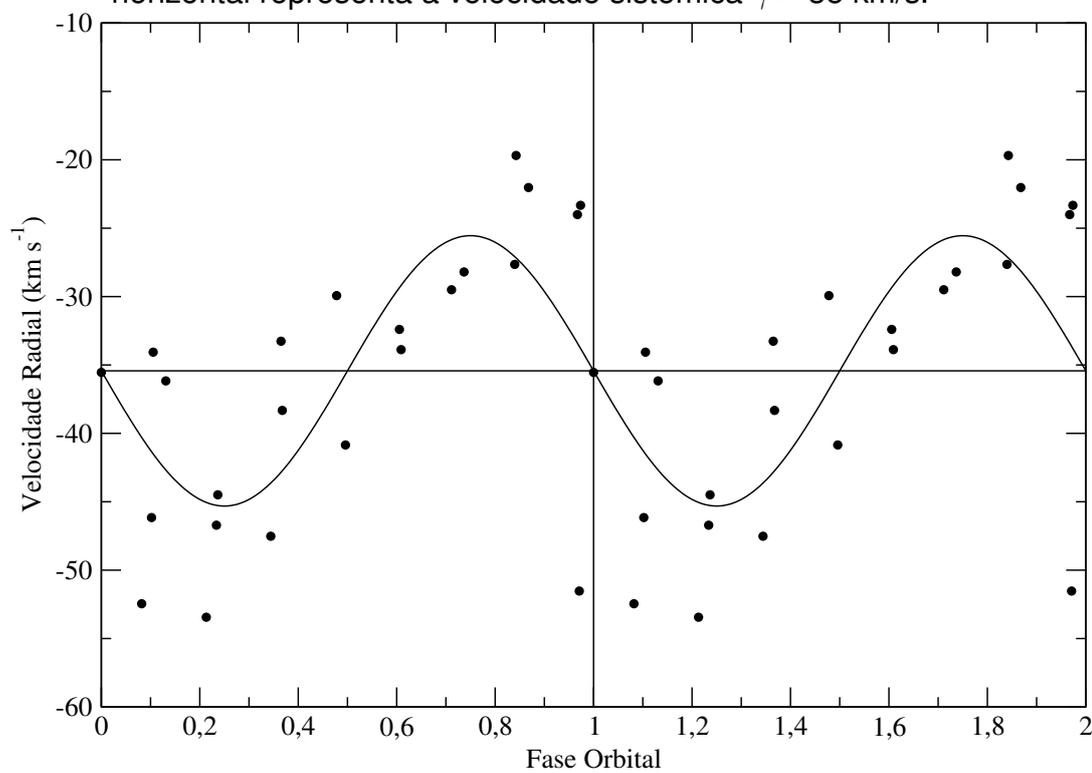


Figura 24 - Curva de velocidade radial de $H\beta$ em função da fase orbital dos dados 2015. A curva apresenta o melhor ajuste senoidal aos pontos e a reta horizontal representa a velocidade sistêmica $\gamma = -35$ km/s.

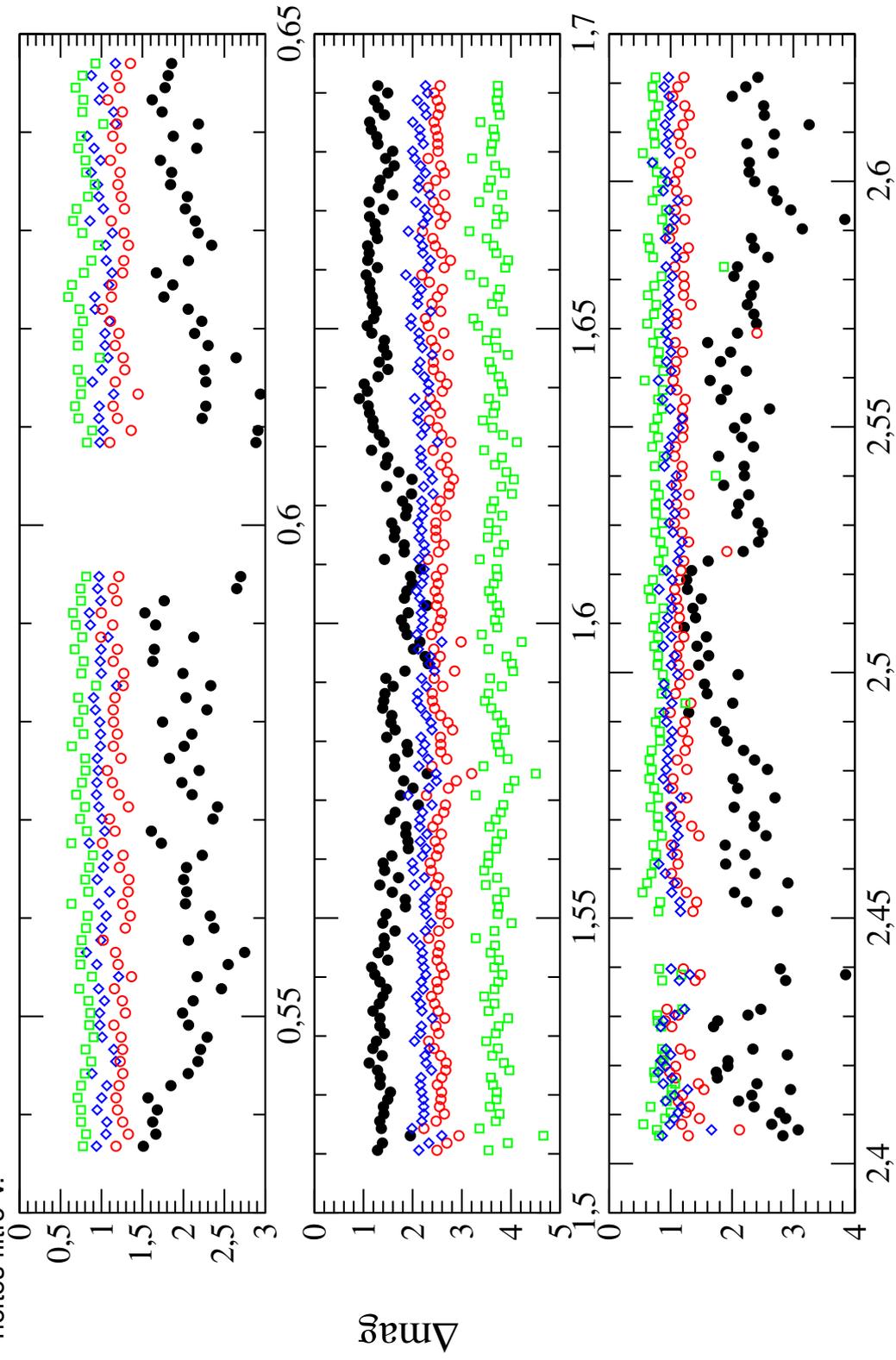


4.2 Fotometria

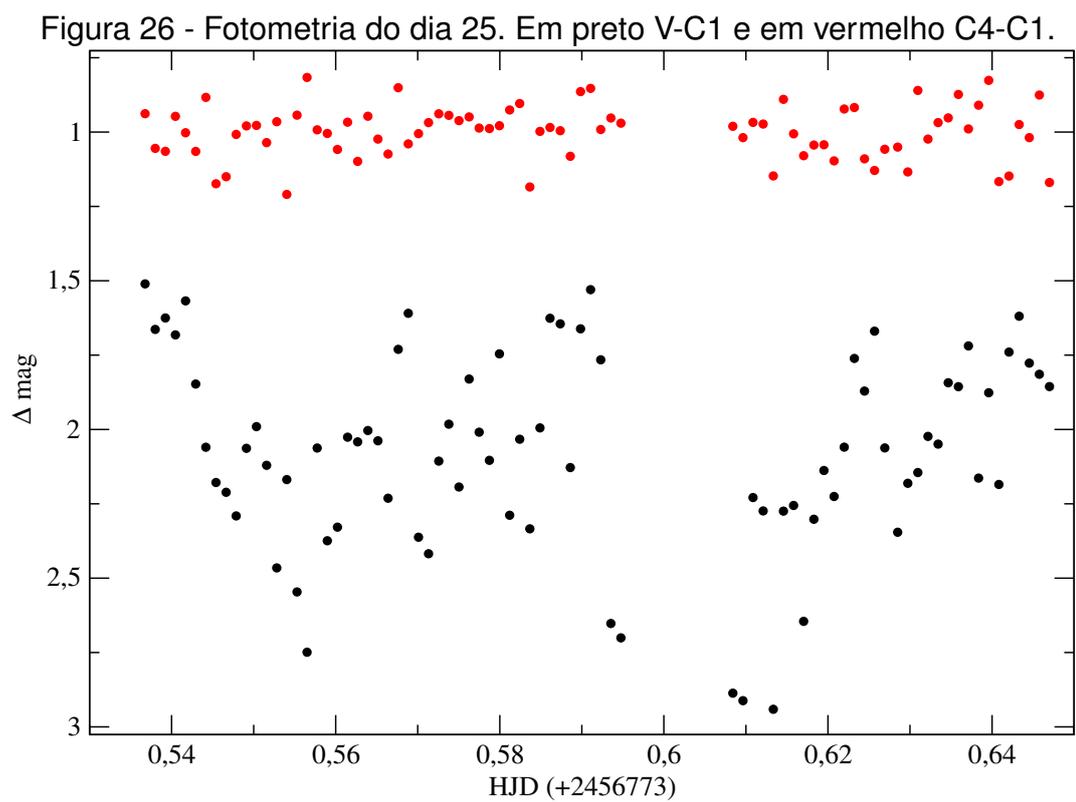
Obtivemos séries temporais de dados de polarimetria em 3 noites consecutivas em abril de 2014, com os filtros V e I. Esses dados têm, como subproduto, a fotometria diferencial de abertura de CSS110225 em relação a estrelas de comparação do mesmo campo. As curvas de luz resultantes estão apresentadas na Fig. 25. As curvas de luz das estrelas de comparação são planas, apesar da dispersão associada ao ruído de fótons, indicando a estabilidade das medidas. A dispersão dos pontos nestas curvas é variável e é causada por variação nas condições de observação, como por exemplo nuvens presentes na terceira noite. Nota-se a variabilidade de brilho da CSS110225 em relação às estrelas de comparação. Não podemos afirmar que a variação de magnitude média da segunda noite em relação às demais seja intrínseca da CSS110225, pois foi usado um filtro (I) diferente.

As Figs. 26, 27 e 28 mostram as curvas de luz (V-C1 e C2-C1) nas três noites, separadamente. A variabilidade de CSS110225 tem amplitude média de 1-1.5 mag em escalas de tempo de dezenas de minutos e é bastante irregular, sem indícios de modulação periódica ou mesmo de eclipses. Para verificar eventuais periodicidades, analisamos estes dados de fotometria, em conjunto e separadamente, com o método PDM, porém nenhum dos periodogramas obtidos apresentou sinal significativo de periodicidade. Para testar a possibilidade de alguma modulação associada ao período espectroscópico de 0,056 dias obtido anteriormente, construímos diagramas de curva de luz em fase com este período para as três noites (Figs. 29, 30 e 31). Apenas o diagrama da primeira noite apresentou alguma modulação coerente, apesar da baixa significância, enquanto os diagramas das outras noites não apresentam praticamente modulação nenhuma. Construímos também, para estas três noites, as curvas de luz binadas em fase orbital. Na Figura 32 vemos de forma mais clara uma modulação com amplitude de cerca de 0,8 mag nos dados do dia 25, obtidos no filtro V. As demais noites novamente não mostram modulações significativas. Devido à pequena diferença entre os períodos espectroscópicos de 2013 e de 2015 ($\Delta P=0,001$ d), não vimos diferenças relevantes entre as curvas de luz em fase com ambos os períodos.

Figura 25 - Curvas de luz da CSS110225 e das estrelas de comparação C2, C3 e C4 (indicadas na Fig. 9), obtidas em 25, 26 e 27 de abril de 2014 (de cima para baixo no gráfico). Os pontos pretos representam V-C1, os círculos vermelhos C2-C1, os quadrados verdes C3-C1 e os losangos azuis C4-C1. Em 26 de abril (diagrama central) usamos o filtro I, nas demais noites filtro V.



HJD (+2456773)



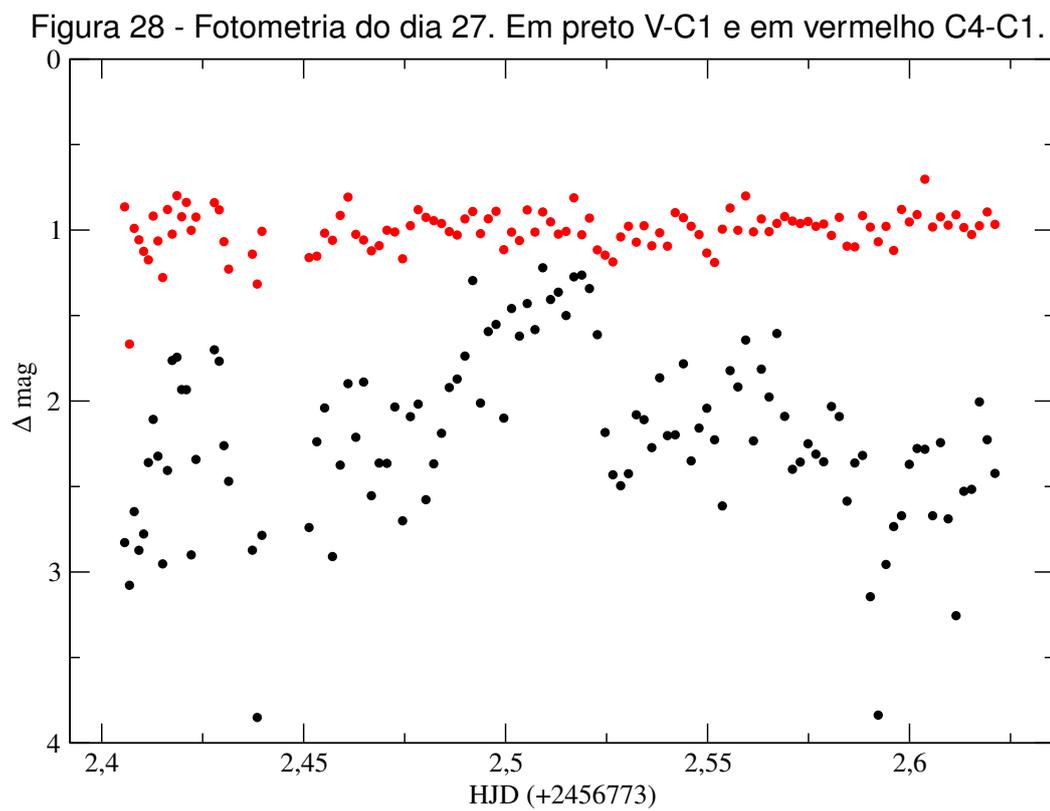
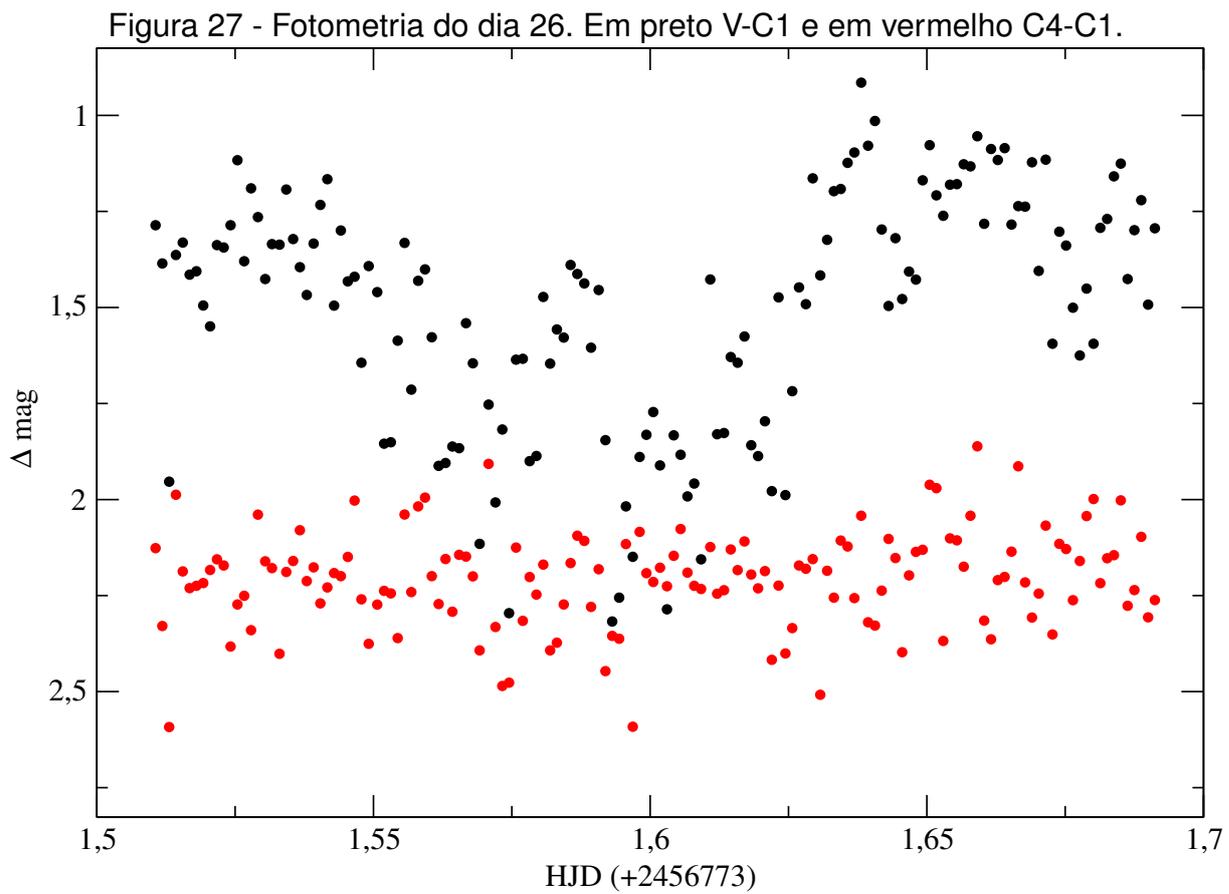


Figura 29 - Fotometria do dia 25 em fase com o período espectroscópico de 0,056 dias.

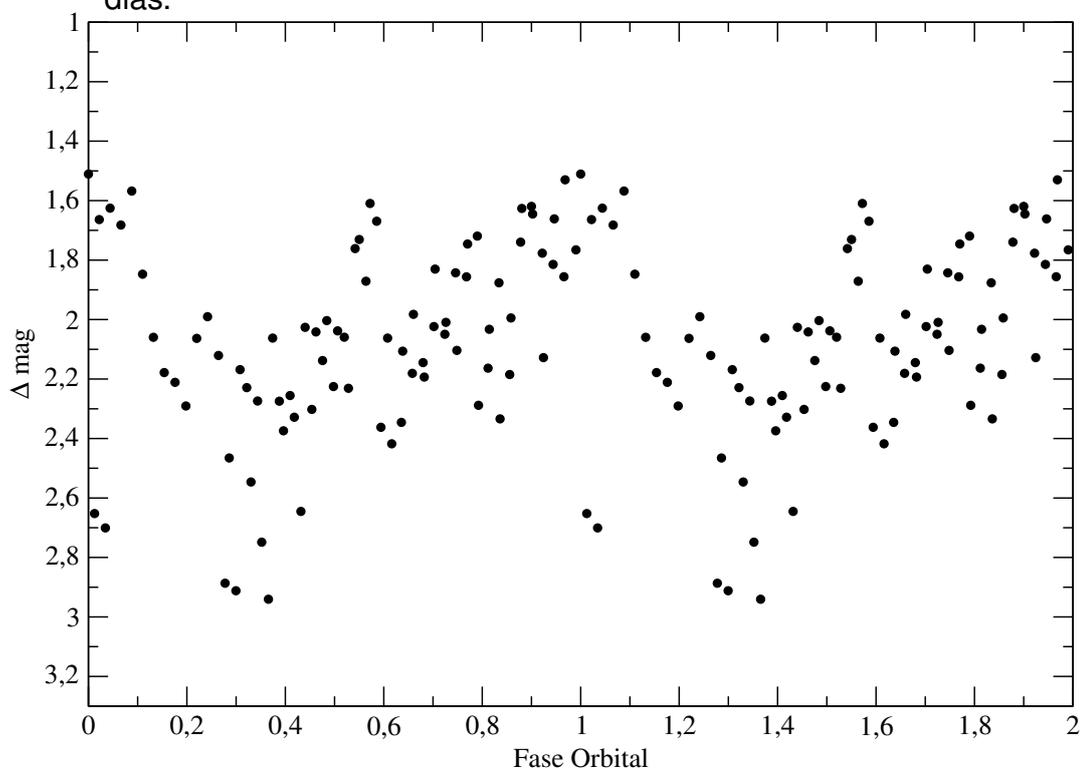


Figura 30 - Fotometria do dia 26 em fase com o período espectroscópico de 0,056 dias.

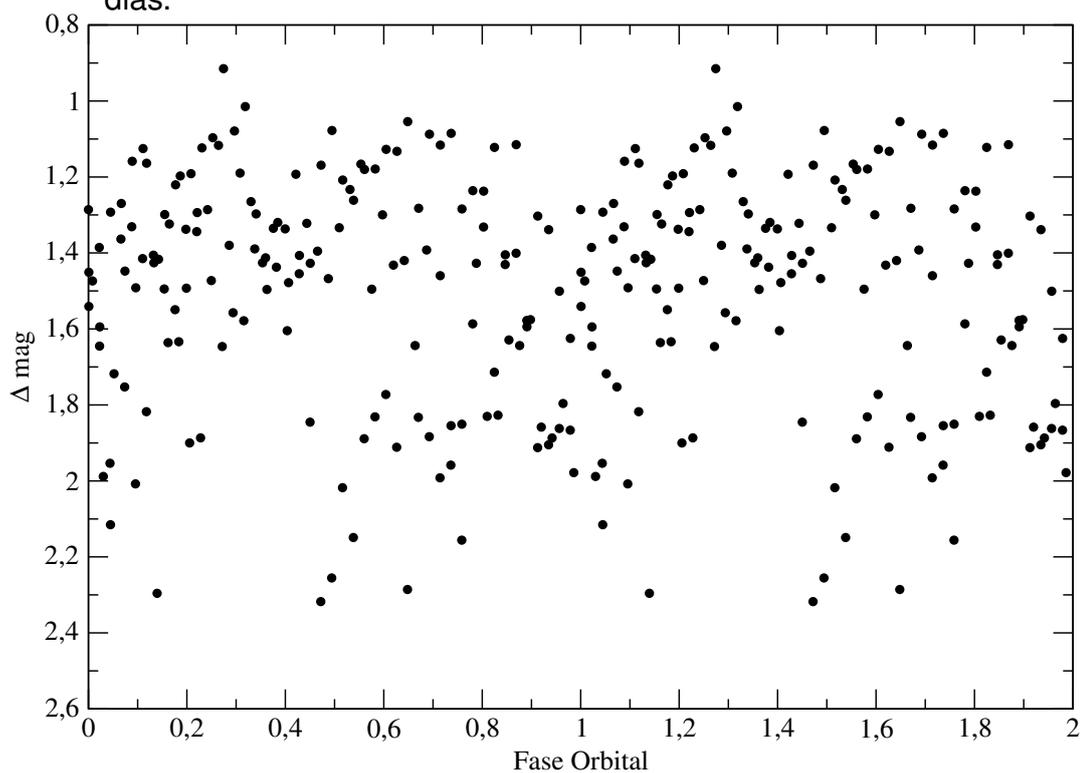


Figura 31 - Fotometria do dia 27 em fase com o período espectroscópico de 0,056dias.

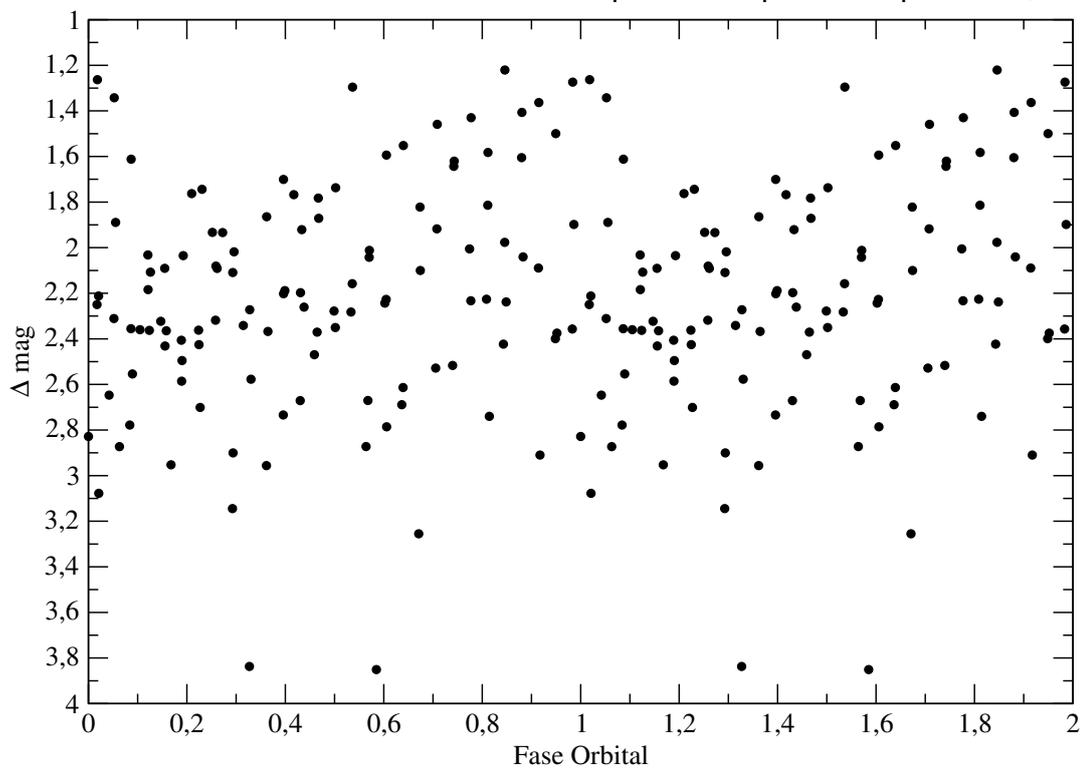
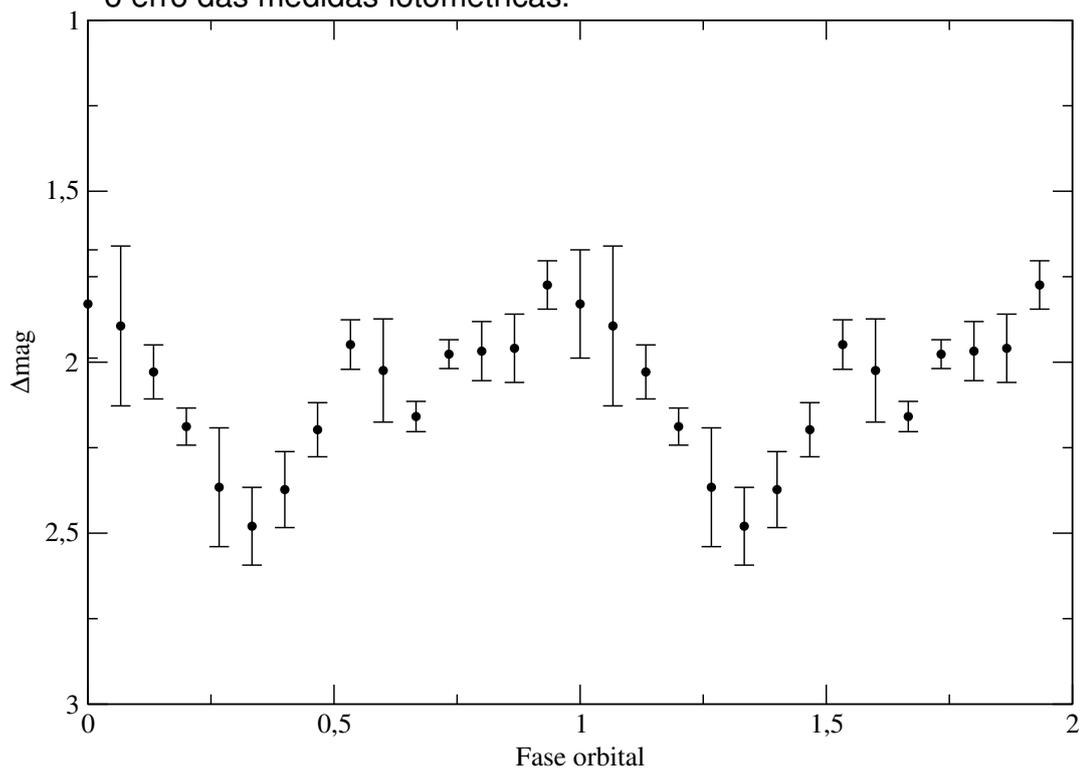


Figura 32 - Binagem dos dados de fotometria do dia 25 de acordo com o período orbital de 0,056 dias. A barra de erro representa a dispersão dos pontos e não o erro das medidas fotométricas.



4.3 Polarimetria

Os dados de polarimetria, obtidos em abril de 2014, são apresentados nas Figuras 33, 34 e 35. A curva do dia 25 apresenta um intervalo sem dados devido a uma pausa nas observações. A polarização circular apresenta uma possível variabilidade com amplitude menor que $\sim 5\%$ nas três noites de observação. De acordo com a curva de luz do CRTS (Fig. 11) nossas observações polarimétricas foram realizadas, muito provavelmente, enquanto o objeto estava em estado alto de brilho, com magnitude entre 18 e 19 no filtro V. O baixo brilho deste objeto, mesmo em estado alto, explica a grande dimensão das barras de erro de nossas medidas de polarimetria. As curvas de polarização linear apresentam ruído ainda maior. Os dados de polarização circular obtidos no filtro I, no dia 26, apresentam uma modulação com amplitude total de cerca de 4% quando colocados em *bins* de fase com o período espectroscópico de 80 min (Fig. 36), porém este comportamento não é observado nos dados obtidos no filtro V nos dias 25 e 27.

Para quantificar as medidas de polarização que obtivemos, apresentamos na Tabela 7 os valores médios da polarização circular de CSS110225 e das estrelas de comparação presentes no campo. Espera-se que as estrelas do campo tenham polarização circular nula, já que são muito raros objetos astrofísicos com polarização circular diferente de zero.

Figura 33 - Polarização do dia 25, sendo V a polarização circular, P a polarização linear e θ o ângulo de posição da polarização linear.

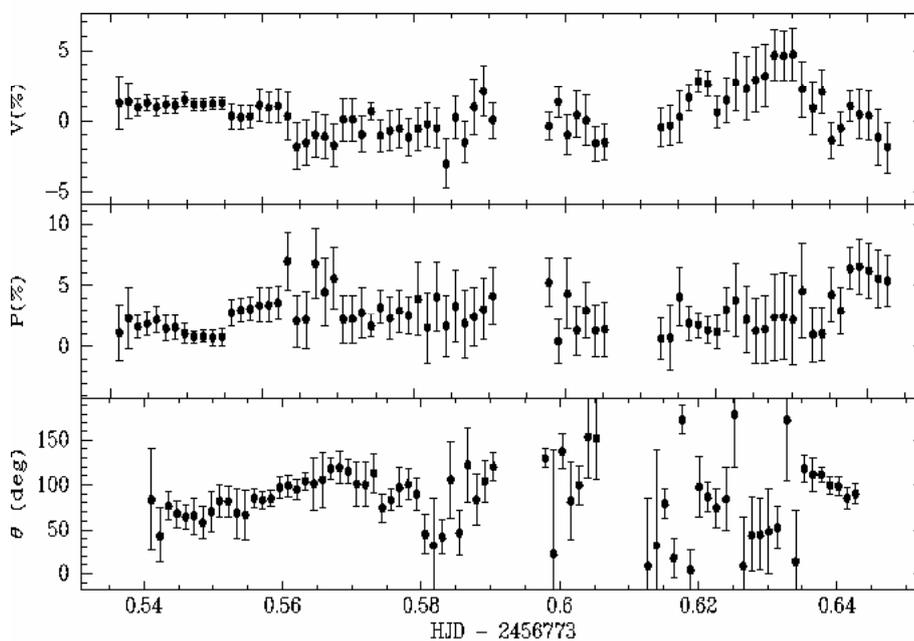


Tabela 7 - Valores médios da polarização circular de CSS110225 e das estrelas de comparação presentes no campo

Objeto	Data	$\langle V \rangle^a$	σ_V^b	σ_V^c
VC	25 abr 14	0,53331	1,57164	1,34379
	26 abr 14	-0,51817	1,93838	1,69660
	27 abr 14	0,49171	1,83782	1,47489
C1	25 abr 14	-0,32015	4,58763	2,52892
	26 abr 14	-0,64514	2,87858	2,03976
	27 abr 14	-0,76069	3,96088	3,65601
C2	25 abr 14	-0,85177	2,92625	2,66436
	26 abr 14	-0,31011	1,22438	1,08155
	27 abr 14	-0,62979	4,78783	3,37243
C3	25 abr 14	-1,57832	2,60659	3,26412
	26 abr 14	-0,01845	0,74278	0,88896
	27 abr 14	0,76107	8,13097	4,76779
C4	25 abr 14	-0,42477	2,67781	2,47357
	26 abr 14	0,13523	1,71344	1,18470
	27 abr 14	1,09635	4,56441	3,40600

^aPolarização circular média

^bValor médio dos erros da polarização circular

^cDesvio padrão da polarização circular

Figura 34 - Polarização do dia 26, sendo V a polarização circular, P a polarização linear e θ o ângulo de posição da polarização linear.

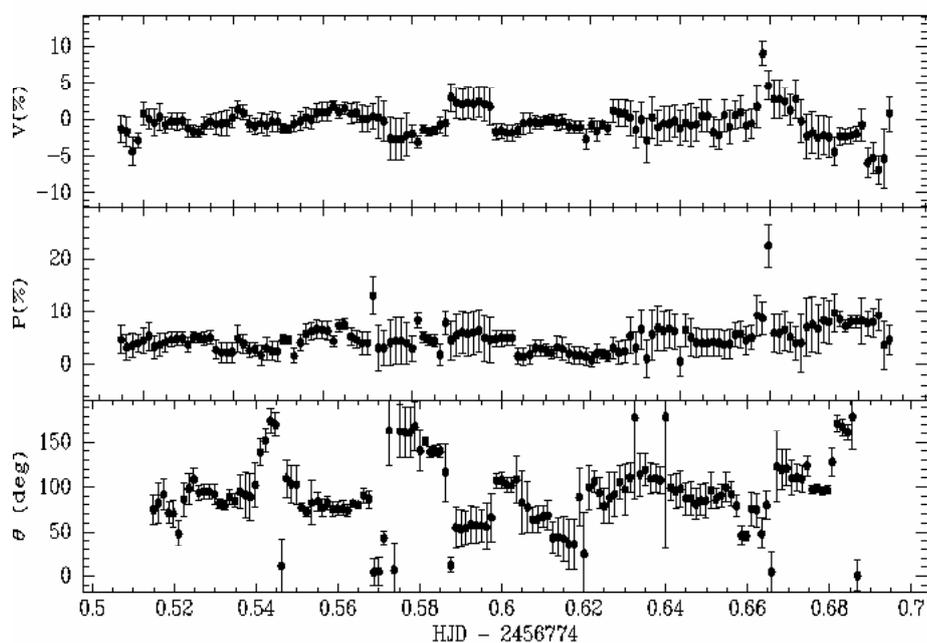


Figura 35 - Polarização do dia 27, sendo V a polarização circular, P a polarização linear e θ o ângulo de posição da polarização linear.

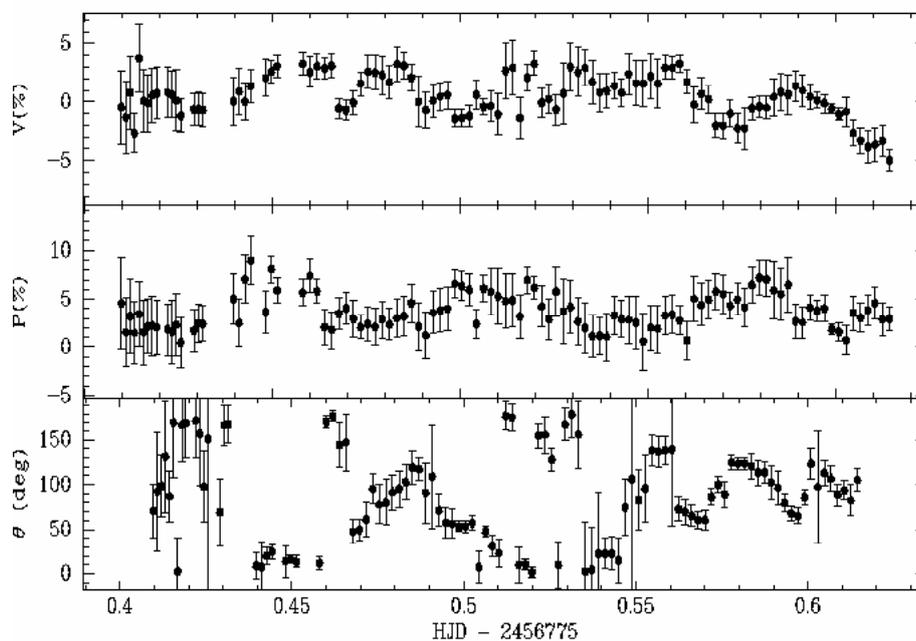
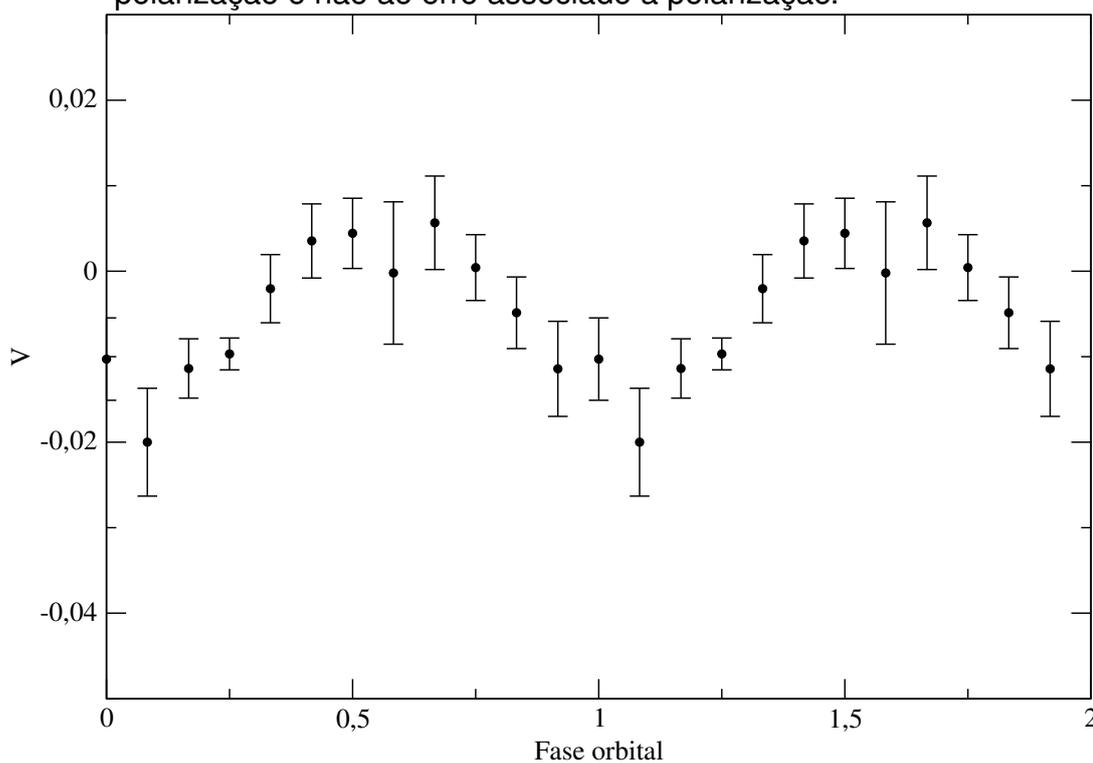


Figura 36 - Binagem dos dados polarimétricos do dia 26 utilizando o período orbital de 0,056 dias. As barras de erro correspondem a dispersão dos pontos da polarização e não ao erro associado a polarização.



5 Discussão e conclusões

O sistema CSS110225 foi descoberto pelo CRTS por sua variabilidade fotométrica de longo prazo e pré-classificado como um candidato a polar (Drake, Djorgovski, A. A. Mahabal et al., 2011). Sua curva de luz no CRTS apresenta dois estados de brilho distintos: um estado baixo com magnitudes abaixo de 20 e um estado alto com magnitudes entre 17,5 e 19,2. A duração de cada um destes estados é maior de que 4 anos. Variáveis Cataclísmicas magnéticas (polares e polares intermediárias - IPs) apresentam normalmente estados distintos de brilho que podem ser interpretados como variação na taxa de transferência de matéria da secundária. Neste cenário, conhecido como transições do tipo VY Scl, manchas estelares associadas à atividade da estrela secundária ocupam transitoriamente a superfície da estrela, na localização do ponto interno de Lagrange (L1), e causam a diminuição da taxa de transferência de matéria (Kafka e Honeycutt, 2005, Livio e Pringle, 1994). As polares, em particular, costumam passar a maior parte do tempo (centenas de dias a anos) em estado alto de brilho, com incursões ao estado baixo com durações de dezenas a centenas de dias (Warner, 1995). É importante notar que a curva de luz de CSS110225 obtida pelo CRTS não se assemelha às curvas típicas de Novas Anãs, que costumam apresentar *outbursts* de grande amplitude (maior que 2 mag) mas de curta duração.

Os dados de fotometria do CRTS a que temos acesso para análise não correspondem ao conjunto completo de dados das curvas de luz apresentadas na Fig. 11. Os dados são distribuídos no *Data Release 2 (CSDR2)* apenas após a calibração fotométrica (Drake, comunicação privada), de forma que nossa análise detalhada foi realizada sobre uma curva de luz que continha apenas 6 pontos no estado baixo de brilho e sem nenhum ponto de estado alto dos anos 2014 e 2015. Aplicamos o PDM para busca de periodicidades no conjunto de dados de estado alto, porém não obtivemos nenhum sinal significativo no periodograma.

Nossas observações espectroscópicas, realizadas com o Goodman no telescópio SOAR, mostram algumas características coerentes com a classificação como uma Variável Cataclísmica magnética em alto estado de acréscimo de matéria, como o decremento de Balmer invertido, a presença das linhas de HeI e HeII, e a intensidade e largura das linhas de emissão (FWHM $\sim 500 - 600$ km/s). No entanto, a linha de HeII 4686 Å em nossos espectros apresenta intensidade menor em comparação a espectros típicos de polares em alto estado. Em comum com as características das polares este objeto também apresenta perfis das linhas de Hidrogênio com uma componente larga de baixa intensidade e uma componente estreita e muito intensa, que ajustamos globalmente através de perfis de Lorentz. Nas polares, em geral a componente larga é originada no fluxo de matéria na magnetosfera da anã branca enquanto que a compo-

nente estreita é formada na trajetória balística próxima à estrela secundária. Nossos espectros não mostram sinais da estrela companheira ou de harmônicos ciclotron, comuns em polares em baixo estado de acréscimo de matéria. Algumas características importantes de nossos espectros são a estabilidade dos perfis das linhas, em escalas de tempo de horas e também de anos, e a variabilidade da velocidade γ . Nas polares os perfis são extremamente variáveis, e a velocidade γ reflete não necessariamente a velocidade do sistema binário, mas sim a origem das linhas espectrais na *threading region*, no fluxo conectado às linhas de campo magnético ou até mesmo na superfície da secundária.

As curvas de velocidade radial das linhas de Balmer e de HeI e HeII mostram uma modulação com período de 0,056 dias em 2013 e de 0,055 dias em 2015, com amplitude pequena (25 e 10 km/s nos dois anos, respectivamente) em comparação com a amplitude de até 1000 km/s que pode ser encontrada nas velocidades radiais de muitas polares. Os períodos espectroscópicos encontrados (~ 80 minutos) são compatíveis com a distribuição de períodos orbitais de Variáveis Cataclísmicas em geral e de polares em particular. No entanto, não podemos afirmar por enquanto que este período seja o período orbital do sistema, podendo estar associado a rotação da anã branca.

A fotometria obtida no OPD resulta em curvas de luz com variações irregulares e amplitude máxima de $1 - 1,5$ mag, sem modulação periódica ou eclipses aparentes. A análise de periodicidades (PDM) aplicada aos dados de fotometria não resultou em sinais significativos. A curva de luz do dia 25, binada em fase com o período espectroscópico, apresenta uma modulação com amplitude próxima a 0,8 mag. No entanto, devido à curta cobertura temporal desta monitoria (160 min, ~ 2 ciclos espectroscópicos) e a ausência desta modulação nas outras noites, não podemos afirmar que esta modulação seja realmente associada ao período espectroscópico e não a um artefato dos dados. Os dados fotométricos disponíveis do CRTS, que possuem uma amostragem média de 4 medidas a cada 20 dias, quando colocados em fase com o período espectroscópico também não apresentaram modulação significativa.

A polarização de CSS110225, nos nossos dados em filtro V e I, é baixa e dominada por ruído. As polarizações circular e linear variam com uma amplitude menor que 5%, com fases onde ocorrem possíveis mudanças de sinal. Encontramos uma possível modulação da polarização circular em função do período espectroscópico nos dados de filtro I binados em fase. A detecção de polarização é classicamente um dos principais argumentos para a classificação como uma polar, no entanto as grandes barras de erro em nossos dados não permitem identificar de maneira inequívoca a presença de polarização neste objeto.

As IPs, por sua vez, podem apresentar espectros muito parecidos com os das polares em alto estado, porém a linha de HeII 4686 Å geralmente tem intensidade mais baixa que $H\beta$ (Warner, 1995). Além disso, as IPs podem exibir estados alto/baixo de brilho (Simon, 2014). Apesar da detecção de forte emissão polarizada ser uma característica que define as polares, polarização circular de muito baixa porcentagem pode ser encontrada em cerca de 10 das mais de 140 IPs conhecidas (Mukai, 2014), como visto nas IPs BG CMi e PQ Gem (Cropper, 1986, Berriman, 1988, Stockman et al., 1992 e Buckley et al., 1995). BG CMi tem polarização com porcentagem crescente do azul para o vermelho, atingindo cerca de 4% na banda H (West, Berriman e Schmidt, 1987), na qual modelagem indica que a polarização no vermelho provém de *bremstrahlung* e no infravermelho de emissão cíclotron. A IP PQ Gem apresenta polarização circular e linear, também no vermelho e IV, com amplitude de 2% e modulada como período de 13,9 min de rotação da anã branca.

Não encontramos correlação com fontes de raios-X nas coordenadas de CSS110225. O *ROSAT All-Sky Survey*, por exemplo, não identifica nenhuma fonte dentro de um círculo de 20 arcmin de raio centrado na posição do sistema. Polares geralmente são fontes relativamente fracas de raios-X duros e fontes intensas de raios-X moles ($\sim 10 - 100$ eV) (Warner, 1995). A não-detecção de raios-X, no entanto, não exclui a possibilidade deste objeto ser uma polar que estava em baixo estado de luminosidade durante o *survey* do ROSAT, situação que não é comum em outros casos de polares confirmadas (veja por exemplo Szkody, S. F. Anderson, Hayden et al., 2009).

O sistema CSS110225 exibe um espectro característico de Variáveis Cataclísmicas magnéticas, compatível com uma polar de baixa polarização. Detectamos modulação com período da ordem de 80 minutos nas velocidades radiais das linhas espectrais de emissão de Hidrogênio, e indícios (não estáveis) desta modulação na curva de luz fotométrica e na polarização no filtro I. A determinação definitiva da natureza deste objeto depende de observações adicionais, e medidas de polarimetria com melhor relação sinal/ruído são fundamentais. A eventual detecção do período de rotação da anã branca não sincronizada com o período orbital, por outro lado, confirmaria a classificação deste objeto como uma polar intermediária. Não podemos descartar a hipótese que a modulação de 80 min nas velocidades radiais seja o período de rotação da anã branca e que o período orbital, ainda não detectado, seja maior que isso. Modulações associadas à rotação da anã branca são observadas nas curvas de velocidades radiais de linhas de emissão de IPs, como por exemplo no caso de 1RXS J154814.5-452845 (de Martino et al., 2006), que apresenta período de rotação de 11,5 min e período orbital de 9,87 h.

A perspectiva para a continuidade do trabalho com a CSS110225, no douto-

rado do autor, inclui a realização de mais observações fotométricas, espectroscópicas e polarimétricas, e aplicação de técnicas de análise dos espectros como o método de Gaussianas Duplas (Schneider e Young, 1980) e de *Temporal Variance Spectrum* - TVS (Fullerton, Gies e Bolton, 1996), além da modelagem das curvas de luz e de polarização com o código Cyclops (Costa e Rodrigues, 2009 e Silva et al., 2013). O futuro doutorado também contemplará a análise de outras candidatas a mVCs descobertas pelo projeto de busca de polares realizado com o SOAR.

Em resumo, concluímos que:

- De acordo com nossos dados, esse sistema apresenta baixa inclinação orbital;
- Apresenta características de polar com campo magnético baixo;
- Não podemos descartar a hipótese que a modulação de 80 min nas velocidades radiais seja o período de rotação da anã branca e que o período orbital, seja maior que isso, levando a uma classificação como IP;
- A determinação definitiva da natureza deste objeto depende de observações adicionais com medidas de melhor relação sinal/ruído.

Bibliografia

- Berriman, G.: "Observations of DQ HER stars". Em: *Polarized Radiation of Circumstellar Origin*. Ed. por G. V. Coyne et al. 1988, pp. 281–305.
- Buckley, D. A. H. et al.: *RX J1712.6-2414: a polarized intermediate polar from the ROSAT Galactic Plane Survey*. Em: *MNRAS* 275 (ago. de 1995), pp. 1028–1048.
- Chanmugam, G. e A. Ray: *The rotational and orbital evolution of cataclysmic binaries containing magnetic white dwarfs*. Em: *ApJ* 285 (out. de 1984), pp. 252–257. DOI: 10.1086/162499.
- Clemens, J. C., J. A. Crain e R. Anderson: "The Goodman spectrograph". Em: *Ground-based Instrumentation for Astronomy*. Ed. por A. F. M. Moorwood e M. Iye. Vol. 5492. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. Set. de 2004, pp. 331–340. DOI: 10.1117/12.550069.
- Connon Smith, R.: *Cataclysmic Variables*. Em: *ArXiv Astrophysics e-prints* (jan. de 2007). eprint: astro-ph/0701654.
- Costa, J. E. R. e C. V. Rodrigues: *Stokes imaging of AM Her systems using 3D inhomogeneous models - I. Description of the code and an application to V834 Cen*. Em: *MNRAS* 398 (set. de 2009), pp. 240–248. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.15130.x. arXiv: 0905.3483 [astro-ph.SR].
- Cropper, M.: *Polarization observations of DQ HER stars and other cataclysmic variables*. Em: *MNRAS* 222 (set. de 1986), pp. 225–233.
- *The Polars*. Em: *Space Sci. Rev.* 54 (dez. de 1990), pp. 195–295. DOI: 10.1007/BF00177799.
- Cumming, A.: *Magnetic field evolution in accreting white dwarfs*. Em: *MNRAS* 333 (jul. de 2002), pp. 589–602. DOI: 10.1046/j.1365-8711.2002.05434.x. eprint: astro-ph/0202079.
- de Martino, D. et al.: *The long period intermediate polar 1RXS J154814.5-452845*. Em: *A&A* 449 (abr. de 2006), pp. 1151–1160. DOI: 10.1051/0004-6361:20053877. eprint: astro-ph/0512531.
- Drake, A. J., S. G. Djorgovski, A. A. Mahabal et al.: *Recent Transient Discoveries from CRTS*. Em: *The Astronomer's Telegram* 3262 (abr. de 2011), p. 1.

- Drake, A. J., S. G. Djorgovski, A. Mahabal et al.: *First Results from the Catalina Real-Time Transient Survey*. Em: *ApJ* 696 (maio de 2009), pp. 870–884. DOI: 10.1088/0004-637X/696/1/870. arXiv: 0809.1394.
- Ferrario, L., D. de Martino e B. T. Gänsicke: *Magnetic White Dwarfs*. Em: *Space Sci. Rev.* (Maio de 2015). DOI: 10.1007/s11214-015-0152-0. arXiv: 1504.08072 [astro-ph.SR].
- Fossati, L. et al.: “Standard Stars for Linear Polarization Observed with FORS1”. Em: *The Future of Photometric, Spectrophotometric and Polarimetric Standardization*. Ed. por C. Sterken. Vol. 364. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. Abr. de 2007, p. 503.
- Fullerton, A. W., D. R. Gies e C. T. Bolton: *Absorption Line Profile Variations among the O Stars. I. The Incidence of Variability*. Em: *ApJS* 103 (abr. de 1996), p. 475. DOI: 10.1086/192285.
- Hagen, H.-J. et al.: *The Hamburg Quasar Survey. I. Schmidt observations and plate digitization*. Em: *A&AS* 111 (maio de 1995), p. 195.
- Hamuy, M., N. B. Suntzeff et al.: *Southern spectrophotometric standards, 2*. Em: *PASP* 106 (jun. de 1994), pp. 566–589. DOI: 10.1086/133417.
- Hamuy, M., A. R. Walker et al.: *Southern spectrophotometric standards*. Em: *PASP* 104 (jul. de 1992), pp. 533–552. DOI: 10.1086/133028.
- Hellier, C.: *Cataclysmic Variable Stars*. Jan. de 2001.
- Kafka, S. e R. K. Honeycutt: *High/Low States in Magnetic Cataclysmic Variables*. Em: *AJ* 130 (ago. de 2005), pp. 742–758. DOI: 10.1086/431793.
- Livio, M. e J. E. Pringle: *Star spots and the period gap in cataclysmic variables*. Em: *ApJ* 427 (jun. de 1994), pp. 956–960. DOI: 10.1086/174202.
- Lubow, S. H. e F. H. Shu: *Gas dynamics of semidetached binaries*. Em: *ApJ* 198 (jun. de 1975), pp. 383–405. DOI: 10.1086/153614.
- Magalhães, A. M., E. Benedetti e E. H. Roland: *A Photoelectric Polarimeter with Tilt-Scanning Capability*. Em: *PASP* 96 (maio de 1984), p. 383. DOI: 10.1086/131351.
- Magalhães, A. M., C. V. Rodrigues et al.: “High Precision CCD Imaging Polarimetry”. Em: *Polarimetry of the Interstellar Medium*. Ed. por W. G. Roberge e D. C. B. Whittet. Vol. 97. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 1996, p. 118.

Mukai, K.: *The Catalog of IPs and IP Candidates by Right Ascension - Version 2014 with 143 objects*. Em: <http://asd.gsfc.nasa.gov/Koji.Mukai/iphome/catalog/alpha.html> (2014). Acessado em 12/09/2015.

Norton, A. J. et al.: *The Accretion Flows and Evolution of Magnetic Cataclysmic Variables*. Em: *ApJ* 672 (jan. de 2008), pp. 524–530. DOI: 10.1086/523932. arXiv: 0709.4186.

Pereyra, A.: “Dust and Magnetic Field in Dense Regions of the Interstellar Medium”. Tese de doutorado. Depto. de Astronomia, Instituto Astronômico e Geofísico, USP, Rua do Matão 1226 - Cidade Universitária 05508-900 São Paulo SP - BRAZIL. antonio@astro.iag.usp.br, 2000.

Pretorius, M.: “The space density of magnetic and non-magnetic cataclysmic variables, and implications for CV evolution”. Em: *The X-ray Universe 2014*. Jul. de 2014, p. 164. arXiv: 1407.3149 [astro-ph.SR].

Ritter, H. e U. Kolb: *VizieR Online Data Catalog: Cataclysmic Binaries, LMXBs, and related objects (Ritter+, 2014)*. Em: *VizieR Online Data Catalog 1* (set. de 2011), p. 2018.

Rodrigues, C. V., D. Cieslinski e J. E. Steiner: *Polarimetry and spectroscopy of the polar RX J1141.3-6410*. Em: *A&A* 335 (jul. de 1998), pp. 979–984. eprint: astro-ph/9805193.

Schmidt, G. D. e H. S. Stockman: *Synchronization of the magnetic Nova V1500 Cygni*. Em: *ApJ* 371 (abr. de 1991), pp. 749–760. DOI: 10.1086/169939.

Schneider, D. P. e P. Young: *The magnetic maw of 2A 0311-227*. Em: *ApJ* 238 (jun. de 1980), pp. 946–954. DOI: 10.1086/158059.

Silva, K. M. G. et al.: *Stokes imaging of AM Her systems using 3D inhomogeneous models - II. Modelling X-ray and optical data of CP Tucanae*. Em: *MNRAS* 432 (jun. de 2013), pp. 1587–1599. DOI: 10.1093/mnras/stt578. arXiv: 1304.2605 [astro-ph.SR].

Simon, V.: *Changing patterns of the long-term activity of the intermediate polar V1223 Sgr*. Em: *New Astronomy* 33 (nov. de 2014), pp. 44–51.

Stellingwerf, R. F.: *Period determination using phase dispersion minimization*. Em: *ApJ* 224 (set. de 1978), pp. 953–960. DOI: 10.1086/156444.

Stockman, H. S. et al.: *A search for circular polarization in cataclysmic variables*. Em: *ApJ* 401 (dez. de 1992), pp. 628–641. DOI: 10.1086/172091.

- Szkody, P., S. F. Anderson, K. Brooks et al.: *Cataclysmic Variables from the Sloan Digital Sky Survey. VIII. The Final Year (2007-2008)*. Em: *AJ* 142, 181 (dez. de 2011), p. 181. DOI: 10.1088/0004-6256/142/6/181. arXiv: 1109.6349 [astro-ph.SR].
- Szkody, P., S. F. Anderson, M. Hayden et al.: *Cataclysmic Variables from SDSS. VII. The Seventh Year (2006)*. Em: *AJ* 137 (abr. de 2009), pp. 4011–4019. DOI: 10.1088/0004-6256/137/4/4011. arXiv: 0901.3177 [astro-ph.GA].
- Turnshek, D. A. et al.: *An atlas of Hubble Space Telescope photometric, spectrophotometric, and polarimetric calibration objects*. Em: *AJ* 99 (abr. de 1990), pp. 1243–1261. DOI: 10.1086/115413.
- Warner, B.: *Cataclysmic variable stars*. Em: *Cambridge Astrophysics Series 28* (1995).
- West, S. C., G. Berriman e G. D. Schmidt: *The discovery of near-infrared polarized cyclotron emission in the intermediate polar BG Canis Minoris*. Em: *ApJ* 322 (nov. de 1987), pp. L35–L39. DOI: 10.1086/185032.
- Wickramasinghe, D. T. e K. Wu: *A New Evolutionary Model for Am-Herculis Binaries*. Em: *MNRAS* 266 (jan. de 1994), p. L1.
- Witham, A. R. et al.: *Newly discovered cataclysmic variables from the INT/WFC photometric $H\alpha$ survey of the northern Galactic plane*. Em: *MNRAS* 382 (dez. de 2007), pp. 1158–1168. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2007.12426.x. arXiv: 0710.5163.
- York, D. G. et al.: *The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary*. Em: *AJ* 120 (set. de 2000), pp. 1579–1587. DOI: 10.1086/301513. eprint: astro-ph/0006396.
- Zhang, C. M., D. T. Wickramasinghe e L. Ferrario: *Is there evidence for field restructuring or decay in accreting magnetic white dwarfs?* Em: *MNRAS* 397 (ago. de 2009), pp. 2208–2215. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.15154.x. arXiv: 0905.4829 [astro-ph.HE].